

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації  
Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Комп'ютеризований навчальний засіб для практичного вивчення  
цифрової трансформації допоміжного виробництва на хімічному  
підприємстві»

Виконав: студент 2 курсу, групи 1АКІТР-24м  
спеціальності 174 – Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка  
(шифр і назва спеціальності)

Андрій ТИМЧУК  
(ІПБ студента)

Керівник: к.т.н., проф. кафедри АІТ  
Володимир ПАПІНОВ  
(науковий ступінь, вчене звання / посада, ІПБ керівника)

« 12 » 12 2025 р.

Опонент: к.т.н., доцент каф. КН  
Валерій ДЕНИСЮК  
(науковий ступінь, вчене звання / посада, ІПБ опонента)

« 13 » 12 2025 р.

Допущено до захисту  
Завідувач кафедри АІТ  
д.т.н., проф. Олег Бісікало  
(науковий ступінь, вчене звання)

« 13 » срудня 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет  
Інститут інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації  
Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій  
Школа вищої освіти \_\_\_\_\_ ІІ-ий (магістерський)  
Навчальний предмет – 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації  
Спеціальність – 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка  
Світньо-професійна програма – Інтелектуальні комп'ютерні системи

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри АІТ  
д.т.н., проф. Олег БІСІКАЛО

«26» вересня 2025 р.

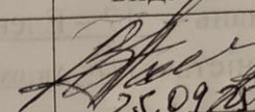
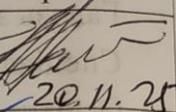
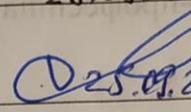
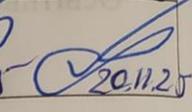
### ЗАВДАННЯ

## НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Тимчуку Андрію Олександровичу  
(ПІБ автора повністю)

1. Тема роботи: Комп'ютеризований навчальний засіб для практичного вивчення цифрової трансформації допоміжного виробництва на хімічному підприємстві.  
Керівник роботи: к.т.н., проф. каф. АІТ Папінов В.М.  
Затвердженні наказом ВНТУ від «24» вересня 2025 року № 313.
2. Строк подання роботи студентом: до «12» грудня 2025 року.
3. Вихідні дані до роботи: Комп'ютеризований навчальний засіб (КНЗ) призначений для забезпечення практикумів професійних дисциплін "Киберфізичні системи автоматизації виробництва" (4 курсе бакалаврської підготовки) та "Промисловий Інтернет речей" (1 курс магістерської підготовки). КНЗ повинен створювати умови для індивідуальної когнітивної діяльності здобувача при вирішенні реальних проєктних задач, сприяти більш глибокому вивченню здобувачем теоретичного матеріалу вказаних навчальних дисциплін, а також давати можливість сформувати у здобувача відповідні професійно-орієнтовані практичні уміння та навички проєктування цифрової трансформації реальних технологічних процесів. КНЗ повинний будуватися на основі трьох існуючих лабораторних моделей: на фізичній моделі технологічного процесу «віртуального» допоміжного виробництва, на організаційній моделі «віртуального виробництва» та на програмно-технічній імітаційній моделі інтегрованої автоматизованої системи управління (ІАСУ) «віртуальним виробництвом» в цілому та окремими його технологічними процесами
4. Зміст текстової частини: 1) Науково-технічне та техніко-економічне обґрунтування роботи, 2) Проєктування процесу виконання стадії «Моделювання існуючого автоматизованого АТП», 3) Проєктування процесу виконання стадії «Аналіз реального автоматизованого АТП», 4) Заключна стадія практичного вивчення цифрової трансформації реального АТП. 5) Економічний розділ; Висновки; Список використаних джерел.
5. Перелік ілюстративного (або графічного) матеріалу: 1) Архітектура комп'ютеризованого навчального засобу, 2) Проєктування процесу виконання стадії «Моделювання існуючого АТП», 3) Моделювання існуючого реального АТП, 4) Проєктування процесу виконання стадії "Аналіз реального АТП", 5) Проєкт архітектури програмного забезпечення АТП для І4.0, 6) Проєкт машинних взаємодій АТП для І4.0

6. Консультанти розділів роботи

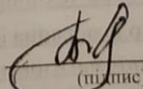
Розділ змістової частини роботи	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 – 4	Володимир ПАПІНОВ, к.т.н., проф. кафедри АІТ	 25.09.25	 20.11.25
4	Володимир КОЗЛОВСЬКИЙ, к.е.н., проф. каф. ЕПтаВМ	 25.09.25	 20.11.25

7. Дата видачі завдання: «25» вересня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

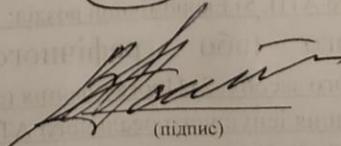
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Науково-технічне та техніко-економічне обґрунтування роботи	25.09–05.10.2025	вик
2	Розробка технічного завдання на магістерську кваліфікаційну роботу	25.09–05.10.2025	вик
3	Проектування стадії «Моделювання існуючого автоматизованого ТП»	05.10 – 25.10.2025	вик
4	Проектування стадії «Аналіз реального автоматизованого ТП»	25.10 – 10.11.2025	вик
5	Проектування та реалізація заключної стадії практичного вивчення цифрової трансформації	05.11 – 20.11.2025	вик
6	Підготовка економічної частини	до 01.12.2025	вик
7	Оформлення пояснювальної записки, графічного матеріалу і презентації	20.11 – 03.12.2025	вик
8	Попередній захист роботи	до 03.12.2025	вик
9	Захист роботи	до 19.12.2025	вик

Студент

  
(підпис)

Андрій ТИМЧУК  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Володимир ПАПІНОВ  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

УДК 378.162+681.51

Тимчук А.О. Комп'ютеризований навчальний засіб для практичного вивчення цифрової трансформації допоміжного виробництва на хімічному підприємстві. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітня програма – Інтелектуальні комп'ютерні системи. Вінниця: ВНТУ, 2025. 163 с.

Укр. мовою. Бібліогр.: 55 назв; рис.: 65; табл. 8.

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблений комп'ютеризований навчальний засіб для практичного вивчення цифрової трансформації допоміжного виробництва на хімічному підприємстві. Комп'ютеризований навчальний засіб призначений для забезпечення практикумів професійних дисциплін "Кіберфізичні системи автоматизації виробництва" (4 курс бакалаврської підготовки) та "Промисловий Інтернет речей" (1 курс магістерської підготовки). На відміну від існуючих комп'ютеризованих навчальних засобів, новий засіб будується на основі інформаційно-освітнього середовища типу «віртуальне виробництво», що дозволило за рахунок використання додаткових локальних або «хмарних» інструментальних засобів моделювання підвищити ефективність практичної підготовки студентів шляхом виконання ескізного проєкту цифрової трансформації існуючого автоматизованого допоміжного виробництва на хімічному підприємстві.

У економічному розділі розраховано витрати на розробку, абсолютний ефект від впровадження, внутрішню дохідність інвестицій та термін окупності.

**Ключові слова:** комп'ютерно-інтегрована технологія, цифрова трансформація, розумне виробництво, навчальне дослідження, комп'ютеризована навчальна лабораторія

## ABSTRACT

Tymchuk F.O. Computerized training tool for practical study of digital transformation of auxiliary production at a chemical enterprise. Master's Qualification Thesis in the specialty 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics, educational program – Intelligent computer systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 163 p.

In Ukrainian language. Bibliography: 55 titles; Fig.: 65; table 8.

In the master's qualification thesis, the computerized educational mean for educational exploring a digital transformation of the supplementary manufacture of industrial enterprise is developed. The computerized educational mean is intended for maintenance of practical works of professional disciplines "Cyber-physical systems of manufacture automation" (4 rate of baccalaureate preparation) and "Industrial Internet of things" (1 rate of magistracy preparations). Unlike existing ones, new computerized educational means are under construction on the basis of the information-educational environment of the «virtual manufacture» type that due to usage of additional local or "cloudy" simulation tools has allowed to increasing an efficiency of student`s educational exploring by designing a digital transformation project for the existing automated supplementary manufacture of industrial enterprise.

In economic section it is calculated expenses for development, absolute effect from introduction of development, internal income of investments and time of recovery of outlay of investments.

**Keywords:** computer-integrated technology, digital transformation, smart manufacture, educational researching, computerized educational laboratory

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	
1 НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОБОТИ .....	
1.1 Цифрова трансформація виробничого підприємства .....	
1.2 Аналіз існуючого технологічного процесу «віртуального виробництва» .....	
1.3 Цифрова трансформація аналогічних технологічних процесів .....	
1.4 Розробка архітектури комп'ютеризованого навчального засобу.....	
1.5 Висновки до розділу .....	
2 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИКОНАННЯ СТАДІЇ «МОДЕЛЮВАННЯ ІСНУЮЧОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО ТП» .....	
2.1 Модель потоку робіт .....	
2.2 Розробка моделей існуючого АТП актором «Викладач» .....	
2.3 Розробка моделей існуючого АТП актором «Студент» .....	
2.4 Висновки до розділу .....	
3 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИКОНАННЯ СТАДІЇ «АНАЛІЗ РЕАЛЬНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО ТП» .....	
3.1 Загальне бачення .....	
3.2 Розробка алгоритму виконання аналізу .....	
3.3 Приклад виконання аналізу .....	
3.4 Висновки до розділу .....	
4 ЗАКЛЮЧНА СТАДІЯ ПРАКТИЧНОГО ВИВЧЕННЯ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ РЕАЛЬНОГО АТП .....	
4.1 Означення основних діяльностей .....	
4.2 Дослідження предметної області І4.0 промислової автоматизації. ....	
4.3 Ескізний проєкт початкової цифрової трансформації АТП .....	
4.4 Концепція поглибленої цифрової трансформації АТП .....	
4.5 Висновки до розділу .....	

5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ .....	
5.1 Технологічний аудит розробленого комп'ютеризованого навчального засобу .....	
5.2 Розрахунок витрат на розроблення комп'ютеризованого навчального засобу .....	
5.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації розробки .....	
5.4 Висновки до розділу .....	
ВИСНОВКИ .....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	
ДОДАТКИ.....	
ДОДАТОК А (обов'язковий) Технічне завдання на магістерську кваліфікаційну роботу .....	
ДОДАТОК Б (обов'язковий) Ілюстративна частина магістерської кваліфікаційної роботи .....	
ДОДАТОК В (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи .....	

## ВСТУП

Актуальність роботи. Для підвищення якості підготовки фахівців в області автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій на кафедрі АІТ нещодавно введені до навчального плану дві нові професійно-орієнтовані дисципліни – «Кіберфізичні системи автоматизації виробництва» (бакалаврський рівень підготовки) та «Промисловий Інтернет речей» (магістерський рівень підготовки), які повинні надати студентам основні теоретичні відомості та практичні знання щодо цифрової трансформації існуючого комп'ютерно-інтегрованого виробництва у «розумне» цифрове виробництво, що функціонує за концепцією «Індустрія 4.0» [1]. Основною формою практикуму у цих дисциплінах є лабораторні заняття, на яких студенти мають отримувати практичні знання та набувати професійного досвіду у проектуванні та реалізації різноманітних систем та засобів автоматизації для цифрового виробництва. Тому створення нових ефективних навчальних засобів для навчально-методичного та технічного забезпечення такого лабораторного практикуму є актуальною задачею.

Для реалізації лабораторного практикуму з різних професійно-орієнтованих та спеціальних дисциплін спеціальності 151 на кафедрі АІТ вже створена сучасна комп'ютеризована лабораторія, програмно-технічні засоби якої утворюють інформаційно-освітнє середовище типу «віртуальне підприємство», яке функціонує за сучасною концепцією комп'ютерно-інтегрованого виробництва – «Індустрія 3.0» [2-5]. Це підприємство включає основні та допоміжні технологічні процеси, а також різноманітні обслуговуючі технічні процеси.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є створення на основі існуючого інформаційно-освітнього середовища типу «віртуальне підприємство» комп'ютеризованих навчальних засобів для дослідження студентами спеціальності 151 методів та засобів цифрової трансформації [6] його допоміжного виробництва [7, 8] в рамках концепції «Індустрія 4.0» .

Об'єктом досліджень є навчальний процес підготовки у вищому технічному навчальному закладі фахівців з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Такий об'єкт досліджень зазвичай вивчається в рамках

наукової дисципліни "Інженерна педагогіка".

Предметом досліджень є підвищення ефективності навчального дослідження студентами методів та засобів цифрової трансформації існуючого допоміжного виробництва у «розумне» цифрове виробництво за рахунок використання в лабораторному практикумі сучасних комп'ютеризованих навчальних засобів.

Задачі досліджень магістерської кваліфікаційної роботи:

1. Детальне вивчення існуючої реалізації інформаційно-освітнього середовища типу «віртуальне підприємство».
2. Дослідження методів та засобів цифрової трансформації сучасного підприємства у перспективне «розумне» цифрове підприємство.
3. Техніко-економічне та науково-технічне обґрунтування загальної конфігурації нових комп'ютеризованих навчальних засобів.
4. Розробка технічного завдання на науково-дослідну роботу.
5. Проектування програмно-технічної частини навчальних засобів.
6. Розробка навчально-методичного забезпечення навчальних засобів.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягатиме в тім, що на відміну від існуючих комп'ютеризованих навчальних засобів, нові засоби будуються на основі інформаційно-освітнього середовища типу «віртуальне підприємство», що дозволяє за рахунок використання додаткових локальних або «хмарних» віртуальних інструментальних середовищ підвищити ефективність практичної підготовки студентів шляхом виконання ескізного проекту цифрової трансформації існуючого допоміжного виробництва «віртуального підприємства» (адитивне виробництво на основі 3D-принтера [9, 10], цифрове моделювання продукції, що виготовляється [11, 12], роботизація технологічних процесів [13]).

Практична цінність отриманих результатів дослідження полягатиме в тім, що їх можна буде легко застосувати при створенні аналогічних комп'ютеризованих навчальних засобів для підготовки фахівців споріднених галузей знань та спеціальностей.

Апробація результатів дослідження: основні результати виконання магістерської кваліфікаційної роботи опубліковані в матеріалах щорічної

регіональної науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (Вінниця, ВНТУ, 2026 р.) [14].

Наукові дослідження за темою магістерської кваліфікаційної роботи проводились на основі індивідуального завдання, складеного та затвердженого кафедрою автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій ВНТУ, а також розробленого технічного завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

# 1 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ТА НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОБОТИ

## 1 Цифрова трансформація виробничого підприємства

Високий інтерес до Інтернету речей (IoT) і галас довкола нього обумовлені поширенням предметів повсякденного побуту, постачених підключенням до Інтернету, від кухонної техніки й побутової електроніки до одягу, транспортних засобів і роздрібних товарів [1, 6, 9-15]. Стрімке зростання популярності воістину вражає, і IoT розвивається швидше, ніж хто-небудь міг собі представити. Але у світі виробництва власна версія IoT - Industrial Internet of Things (IIoT), яка є логічним продовженням автоматизації й комунікації (рисунок 1.1), які десятиріччями були частиною виробничого середовища, насамперед в області взаємодії складових виробничого процесу ( machine-to-machine, або M2M).

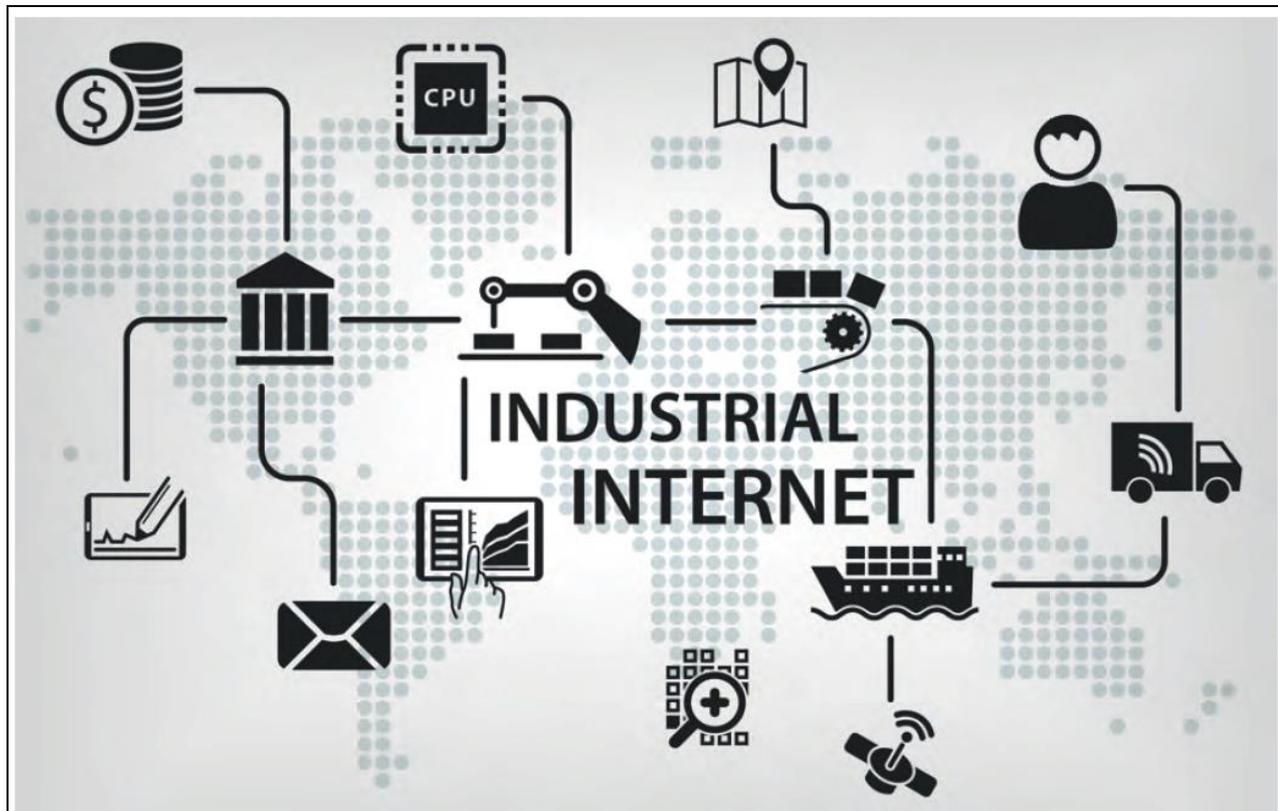


Рисунок 1.1 – IIoT – промисловий Інтернет речей

Зрозуміло, рух ІоТ росте й розширюється, принаймні, так само швидко, як ІоТ у зовнішньому світі, оскільки інтелектуальні пристрої та датчики впроваджуються на виробничих підприємствах усе в більших масштабах. Але перехід від М2М і заводських промислових мереж до повноцінного ІоТ сполучений з рядом складностей, з якими необхідно розбиратися, перш ніж ця нова інтелектуальна технологія автоматизації вийде з-під контролю й призведе до проблем замість переваг, які вона обіцяє забезпечити.

Автоматизація виробничих процесів у тім вигляді, у якому вона існує сьогодні, є відносно замкнутим середовищем, призначеним для комунікації обладнання усередині промислової мережі підприємства, вона не обов'язково взаємодіє з зовнішнім світом через Інтернет. Спочатку класичний підхід до автоматизації передбачав фізичний поділ промислової й корпоративної мережі, що повинне було забезпечити повну ізоляцію систем АСУ ТП від можливих зазіхань різного роду «зловмисників», якими кишать Інтернет і найчастіше корпоративні інформаційні мережі компаній. Таким чином, одним з перших рішень, яких необхідно прийняти керівництву компанії при розгляді можливості впровадження ІоТ, є оцінка потенційних додаткових вигід від ІоТ у порівнянні з ризиком створення уразливості компанії з боку Інтернет у вигляді злону, вірусів і деструктивних шкідливих програм (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Небезпека вразливості Інтернет – одна з основних загроз впровадження ІоТ

Ухвалюючи рішення щодо впровадження елементів IoT, необхідно враховувати наявність засобів інформаційної безпеки, якими виробники обладнання АСУ ТП оснащують свої продукти. Варто розуміти, що методи захисту від «зловмисників» у корпоративній і технологічній мережах у корені відрізняються: якщо при виявленні вірусу на робочому комп'ютері досить просто відключити його від мережі або виключити для подальшого очищення, то вимикання елемента системи АСУ ТП у ході роботи практично завжди спричинить критичне порушення виробничого процесу із трагічними наслідками. Законодавчі органи серйозно ставляться до погроз у сфері IoT і вживають конкретні дії. Нещодавно Федеральна торговельна комісія США подала скаргу на один з великих світових виробників роутерів, обвинувативши компанію в тім, що вона обдурила користувачів щодо рівня безпеки й не почала кроків для забезпечення належного захисту своїх продуктів. Скарга була подана у відповідь на самі уразливості, а не на зловмисників, що використовують уразливості в корисливих цілях. Цей випадок показує, що регулятори займають більш рішучу позицію, жадаючи від виробників підключених пристроїв використання чітких і достатніх заходів щодо забезпечення безпеки продукції.

Зрозуміло, що можна одержати багато переваг IoT і без зовнішнього підключення. Відновлення або зміна складу вузлів внутрішньої мережі може дозволити компанії встановлювати й використовувати нові пристрої й датчики у внутрішньому IoT, і цього може бути цілком достатньо.

Навіщо компанії підключати виробництво до Інтернет? Таке підключення дозволяє одержати доступ до даних IoT і додаткам практично з будь-якого пристрою в будь-який час та з будь-якого місця у світі. Персонал будь-якого рівня може в будь-який час працювати з докладною інформацією про конкретне обладнання, розклади, необхідні позапланові процедури ТОiP і т.д., незалежно від місця знаходження. Керівники можуть перейти до вивчення різних ситуацій і аналізу продуктивності й інших бізнес-показників, перебуваючи у відрядженні, вдома або навіть у шляху. Що ще більш важливо, IoT з підключенням до Інтернету може забезпечити доступ до виробничої інформації й можливості управління для віддалених місць розташування, забезпечити спільну роботу

територіально розподілених виробничих площадок, а також субпідрядних організацій і постачальників.

Незважаючи на те, що більшість внутрішньозаводських комунікацій відбувається по стандартних мережних протоколах, багато існуючих пристроїв використовують власні протоколи, і далеко не всі з них підключені до Інтернету. Чи можуть ці існуючі пристрої відігравати роль на ПоТ-підприємстві? Коротка відповідь: з обмеженнями. Велике питання: чи всі вони повинні бути замінені повністю підключеними до Інтернет пристроями ПоТ? Знову ж, відповідь не проста.

Стратегія й тактика впровадження ПоТ повинні відповідати цілям і завданням компанії. Глобальне впровадження ПоТ на виробництві не є самоціллю і даниною інноваціям, воно означає можливу дорогу заміну не відповідним вимогам ПоТ контролерів і пристроїв, щоб всі виробничі дані були доступні для вузлів мережі й авторизованих віддалених користувачів. Ця стратегія вимагає найбільшої уваги до безпеки й контролю доступу, а також до більшої інформаційної «пильності» на постійній основі. Можливо, що деяке існуюче обладнання може бути модернізоване або модифіковане таким чином, щоб відповідати потребам ПоТ, і його не буде потрібно замінити повністю.

Стратегія часткового підходу до ПоТ дає більше можливостей для подальшого використання деяких або всіх існуючих елементів АСУ ТП і обладнання, а також дозволяє уникнути деяких проблем безпеки. Існуючу промислову мережу можна зберегти й навіть розширити за рахунок додавання необхідної кількості датчиків і пристроїв, залишаючи її при цьому закритою системою, не підключеною до Інтернету. Це, можливо, є перекручуванням ідеалу ПоТ, але може виявитися найбільш практичним підходом до забезпечення оперативного моніторингу й управління виробничим процесом. Управління даними й аналітикою при такому підході може бути досягнуте шляхом поліпшення й оптимізації внутрішньої структури мережі, тому багато переваг ПоТ стають доступними, крім, звичайно, віддаленого доступу до виробничих даних. Така реалізація практично відповідає класичному підходу до автоматизації, про яке говорилося раніше.

Стратегія часткового підходу не зовсім підпадає під визначення ІоТ і, безумовно, не забезпечує переваги доступу до інформації в будь-який час із будь-якого місця. Можливим способом рішення цієї проблеми є передача консолідованої інформації в реляційну базу даних, доступну через Інтернет. Цей підхід не забезпечує одержання даних реального часу, але надає деякі переваги віддаленого доступу, хоч і із трохи обмеженим дотриманням вимог безпеки: хакери можуть одержати доступ до даних, але не до самих елементів управління, і будь-який збиток буде нанесений копії в доступній базі даних, а не вихідним даним, які залишаються у внутрішній мережі.

Якими б не були підхід і глибина реалізації ІоТ, наявність зв'язаних один з одним прямо датчиків, елементів управління й пристроїв, безсумнівно, дає можливість моніторингу й управління, які всього кілька років назад було складно навіть уявити. Компанії можуть відслідковувати все, що відбувається на підприємстві, у філіях і на віддалених виробничих площадках, на заводах субпідрядників і постачальників, на віддалених складах і в транзитних пунктах руху товарів у будь-якій точці світу. Нові й ті, що розвиваються, засоби аналітики й візуалізації роблять великі дані (BigData) ІоТ наочними й корисними, оскільки компанії-лідери постійно прагнуть до підвищення ефективності, оперативності й гнучкості управління своїми бізнес-процесами (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Big Data – новий виклик, породжений технологіями ІоТ

Будь-яка технологічна еволюція неможлива без тимчасових проблем з технологіями, коливань фінансових показників і помилок у тактиці й навіть стратегії, але завжди має ціль підвищити ефективність виробництва. ПоТ може бути просто поточним кроком в еволюції, але це важливий крок. Ми вже можемо уявити, як буде виглядати завтрашнє виробництво, і, зрозуміло, ПоТ буде його очами й вухами.

Оскільки ПоТ часто має на увазі відцифрування продуктів, наприклад, вбудовування датчиків безпосередньо у пристрій або виробниче обладнання, він часто асоціюється винятково з дискретним виробництвом. Але автомобільне виробництво, виробництво промислового обладнання й високі технології далеко не вичерпують потенціалу ПоТ. Дійсно, технології ПоТ мають більші перспективи для виробничого сектора, будь те споживчі товари, хімікати, продукти харчування й напої або інші області. От кілька прикладів.

Моніторинг виробництва: технологія ПоТ використовується для відстеження стану технологічних процесів і виробничого обладнання, відновлення програмного забезпечення, дозволяючи здійснювати його дистанційний моніторинг. Це може бути корисно сервісним службам і аутсорсінговим компаніям для здійснення діагностики й предиктивного техобслуговування, контролю якості й так далі. Застосування технології збору даних з датчиків і пристроїв АСУ ТП у режимі реального часу для цих цілей не є новим й з успіхом вже використовується в сучасних PLM-системах і системах керування виробничими активами (Asset Management). Але впровадження елементів ПоТ, створених для конкретного виробництва, може забезпечувати навіть реалізацію полегшеного варіанта MES на рівні цеху або виробничої ділянки, або, наприклад, надавати можливість моніторингу виробничих процесів із центрального порталу компанії (рисунок 1.4).

Упорядкування ланцюжка поставок: інший спосіб обробки виробничої інформації може використовувати технології ІоТ для поліпшення й оптимізації ланцюжка поставок. Наприклад, одна промислова хімічна компанія змінила параметри пакування, впровадивши в неї мітки з паспортом якості вмісту, щоб новий агрегат для змішування компонентів за допомогою сенсора міг

розпізнавати, зважувати й дозувати інгредієнти, а також відповідно до отриманих даних про якість самостійно коректувати інструкції з температури й змішування залежно від властивостей конкретної партії інгредієнтів.



Рисунок 1.4 – ІюТ забезпечує дистанційний моніторинг та управління процесами

Підвищення якості логістики за рахунок моніторингу геолокації: ще однією областю застосування ІюТ є впровадження міток радіочастотної ідентифікації (RFID) або GPS в пакування партій товарів. Найбільший ефект може бути досягнутий у поставках небезпечного або чутливих до часу транспортування продуктів, таких як ліки з обмеженим строком зберігання й біопрепарати або швидкопсувні продукти харчування. Інтеграція джерел даних контейнерів із продукцією в мережу перевізника здатна в корені змінити практику управління логістикою, оптимізувати часові витрати на транспортування й забезпечити своєчасну доставку одержувачеві поза залежністю від можливих проблем, що виникають на шляху проходження.

Коли справа доходить до впровадження IoT в індустріальному просторі, виробничий менеджмент найчастіше бачить перед собою гадані непереборні перешкоди, у першу чергу, безпеку й безперервність виробництва, які не дозволяють їм навіть почати свій шлях до розгортання ПоТ на підприємстві. Насправді, існують певні ключові кроки, які промисловим компаніям необхідно почати задовго до того, як вони спробують здійснити перехід до ПоТ. Якщо керівники виробництва зроблять все правильно, то вони зможуть підготувати виробничі площадки компанії до успішного переходу до ПоТ у майбутньому.

Починати розгортання технології Інтернету речей необхідно, насамперед, із забезпечення гарантованої працездатності систем. І це важливо з кількох причин:

- застарілі системи управління можуть бути по своїй суті небезпечними, як з погляду виробничої, так і інформаційної безпеки. Це пояснюється тим, що вони були побудовані для іншої епохи автоматизації й споконвічно не призначені для більш складних застосувань, властивих системам з ПоТ;

- на більшості виробництв має місце «клаптева» автоматизація із застосуванням застарілого обладнання й програмного забезпечення, які більше не підтримуються вендорами зовсім або підтримуються за допомогою нескінченних «заплаток». Інтегрування їх в екосистему типу ПоТ призведе до непотрібних вразливостей і комунікаційних проблем;

- пріоритетними для впровадження ПоТ повинні бути активи (виробниче обладнання, АСУ ТП і т.д.), які легко контролювати й обслуговувати віддалено - саме віддалений моніторинг дає досить швидкий і дуже наочний результат, дозволяючи зрозуміти, що підприємство пішло шляхом ПоТ не дарма.

При прийнятті рішень по інвестуванню в ПоТ менеджери АСУ й ІТ повинні розуміти, що необхідно не тільки перебороти проблеми інфраструктури автоматизації, але й провести серйозні роботи з аудита промислового обладнання з метою виявлення тих його елементів, які можуть бути досить легко й швидко модернізовані для включення в нову структуру, передбачити модернізацію, а іноді й заміну існуючих каналів мережних комунікацій для того, щоб забезпечити

їхню пропускну здатність при можливому різкому зростанні обсягів переданих даних; навчити й підготувати персонал до роботи в нових умовах; приділити особливу увагу засобам інформаційної безпеки на рівні АСУ ТП і корпоративних інформаційних систем, а також їхній взаємодії.

Хоча очікування від впровадження ІоТ можуть здатися перебільшеними, сценарії його застосування показують явну перспективу одержання реальних переваг від використання цієї технології для підвищення ефективності виробничих бізнес-процесів. Інтеграція продукту й виробничої екосистеми, з якою він взаємодіє, має колосальний потенціал. Ті компанії, які знайдуть правильне й збалансоване застосування технології ІоТ у процесі виробництва, безсумнівно, зміцнять свої позиції на ринку й забезпечать конкурентоспроможність свого бізнесу.

## **1.2 Аналіз існуючого технологічного процесу «віртуального виробництва»**

На факультеті ІТА (ФІТА) Вінницького національного технічного університету (ВНТУ) змонтована універсальна комп'ютеризована навчальна лабораторія [2], в якій біля кожного універсального лабораторного столу встановлена фізична модель одного з таких технологічних/технічних виробничих об'єктів:

- промислового 3-ємнісного накопичувача/дозатора рідини ("ТО №1");
- промислового хімічного реактора ("ТО №2");
- промислового автоматизованого складу ("ТО №3");
- автоматичного турнікету прохідної підприємства ("ТО №4").

Для управління цими технологічними/технічними об'єктами на них змонтовані усі потрібні промислові засоби автоматизації: датчики та сигналізатори рівня, датчики витрат та температури, безконтактні шляхові вимикачі та імпульсні датчики кута обертання, електромагнітні клапани,

електронасоси, термоелектричний нагрівач, електродвигуни різних типів, частотний перетворювач, зчитувач персональних магнітних карток, спеціалізований контролер управління доступом і т. д.

Крім того, на окремій спеціалізованій стійці №1 встановлені ПЛК "VIPA 313-6CF13" (з опцією "Profibus DP master") та центральна панель оператора "VIPA TP 607LC", а на столі біля стійки встановлена електромеханічна імітаційна модель роботизованої пакувальної лінії. На іншій спеціалізованій стійці №2 змонтований локальний ПЛК "VIPA 314-2BG03" (з опцією "Profibus DP slave") та локальна панель оператора "VIPA TP 607LC", а на столі біля стійки встановлені дві електромеханічні моделі автоматизованих виробничих ліній – лінії з трьома робочими станціями та конвеєром, а також лінії з двома робочими станціями та транспортним роботом.

Робоче місце викладача в лабораторії також оснащено окремим ПК та локальною панеллю оператора "TP 607LC", через які викладач може спостерігати за ходом виконання лабораторних чи практичних завдань на кожному універсальному лабораторному столі.

В рамках даної комп'ютерно-інтегрованої лабораторної системи проводяться практикуми з різних професійно-орієнтованих та спеціальних дисциплін спеціальності 151. Зазвичай практичні завдання цих практикумів пов'язані з автоматизацією управління технологічним/технічними об'єктами. Такі практичні завдання характеризуються найбільшою складністю і тому виконуються студентами тільки старших курсів спеціальності 151.

У 2020 році був запропонований спосіб організації в цій лабораторії інформаційно-освітнього середовища у формі «віртуального виробництва». Цей спосіб передбачає логічне об'єднання усіх наявних в лабораторії моделей технологічних/технічних об'єктів/процесів у єдину імітаційну модель виробництва уявної хімічної продукції [4, 5].

На рисунку 1.5 показана загальна схема даного виробничого процесу, який складається з основного і допоміжного технологічних процесів, а також обслуговуючого технічного процесу промислового складу:

– основний технологічний процес, що має три фази (фаза 1 – модель хімічного реактора, фаза 2 – модель накопичувача/дозатора, фаза 3 – модель роботизованої пакувальної лінії);

– допоміжний технологічний процес (моделі двох автоматизованих виробничих ліній для умовного виготовлення комплектів пустої тари);

– обслуговуючий технічний процес (модель промислового складу для умовного збереження усіх уявних матеріальних ресурсів, напівфабрикатів та продукції «віртуального виробництва»).

На цьому «віртуальному виробництві» імітується виготовлення різних видів рідкої хімічної продукції обмеженими за обсягом партіями у запланований період часу. Таким чином, дане «віртуальне виробництво» організовано у вигляді періодичного виробничого процесу, тобто batching-процесу. Основними ознаками такого виробничого процесу є такі [16-18]:

– різноманітний асортимент продукції, але у відносно малих кількостях (партіях, порціях) за обмежений період часу;

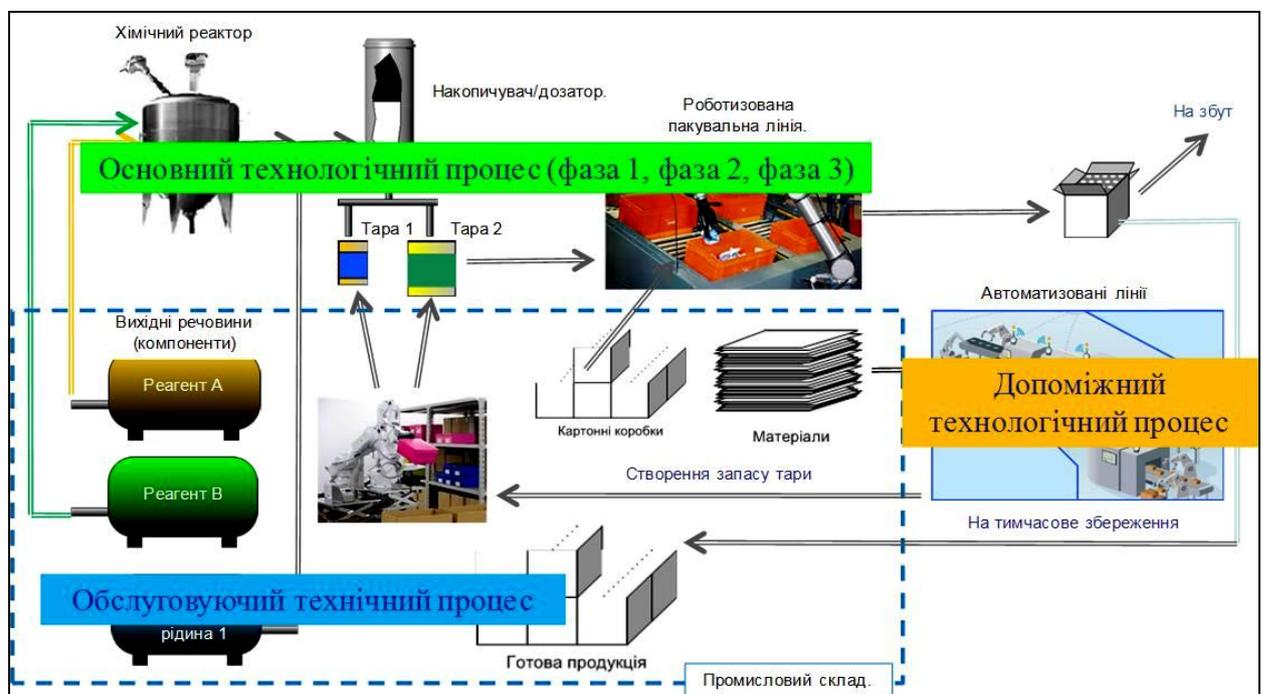


Рисунок 1.5 – Складові процеси «віртуального виробництва» хімічної продукції

- кожна партія/порція виробляється за окремим регламентом, що визначається рецептом (recipe);
- на різних стадіях приготування партії/порції процес потребує багато різних діяльностей, а саме, синхронізації, підрахунку, послідовнісного управління, блокування, обробки матеріалу, регулювання;
- маршрут матеріальних потоків може змінюватися від однієї партії/порції до іншої, а інколи і в межах тієї ж самої партії/порції;
- вхідні сировина й матеріали не зберігають свою індивідуальність, їх можна відстежити тільки по партії/порції;
- одне і те ж універсальне обладнання використовується для різних видів продукції, тому необхідне постійне планування його завантаження.
- для виготовлення однієї й тієї ж партії/порції може використовуватися різне технологічне устаткування/обладнання, що потребує обов'язкового планування використання цього типу ресурсу;
- є найбільш гнучким з усіх існуючих типів виробничого процесу, тому потребує більш складних алгоритмів управління ним.

За темою даної магістерської кваліфікаційної роботи нас найбільше цікавить допоміжний технологічний процес (моделі двох автоматизованих виробничих ліній для умовного виготовлення комплектів пустої тари), який на «віртуальному виробництві» виконує виробниче завдання щодо виготовлення заданої партії комплектів пустої тари, що складається з банки та кришки.

Основою допоміжного виробництва цеху, що відтворюється в лабораторії, є дві автоматизовані виробничі лінії – з конвеєром (лінія №1, допоміжний технологічний процес №1) та з промисловим роботом (лінія №2, допоміжний технологічний процес №2). Лінія №1 призначена для виготовлення партії основного елемента тари – металевих банок заданої форми та ємності.

Лабораторна модель автоматизованої лінії №1 допоміжного виробництва є електромеханічною імітаційною моделлю реальної виробничої лінії, яка складається з трьох виробничих робочих станцій та конвеєра. Зовнішній вигляд моделі (вид зверху) показаний на рисунку 1.6.

На рисунку 1.7 показаний загальний вигляд (вид збоку) даної лабораторної моделі.

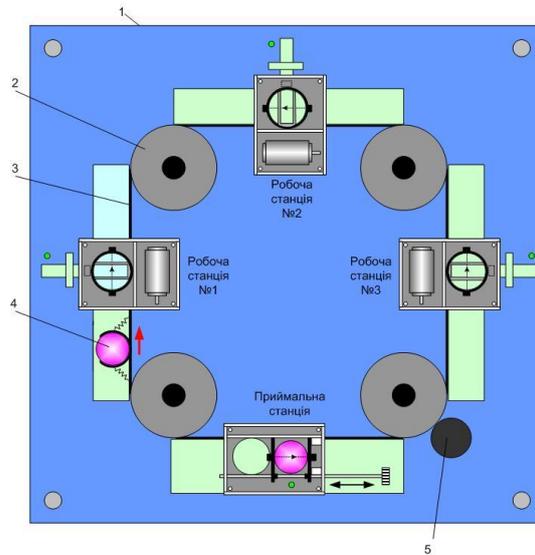


Рисунок 1.6 – Загальний вигляд (вид зверху) лабораторної моделі

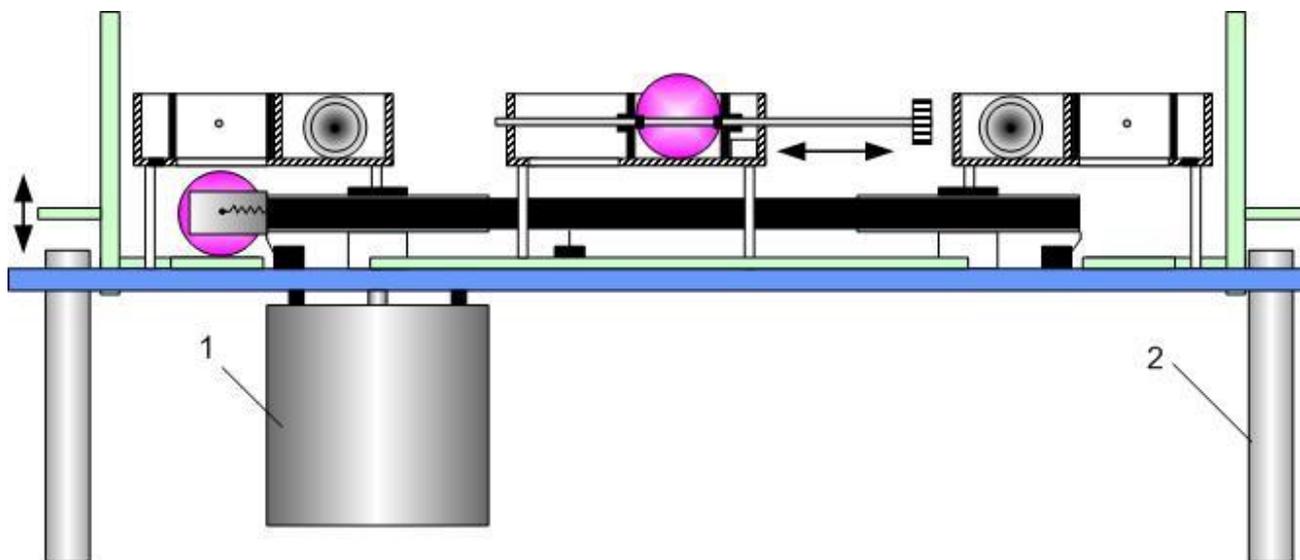


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд (вид збоку) лабораторної моделі

Основу конструкції моделі утворює прямокутний металевий лист 1 (див. рисунок 1.6), що на чотирьох стійках 2 (див. рисунок 1.7) стоїть на горизонтальній поверхні лабораторного столу. Зверху листа закріплені чотири шківки 2 (див.

рисунок 1.6), через які натягнутий зубчастий резиновий ремінь 3. Один із шківів зроблений зубчастим і посаджений на вал асинхронного виконавчого двигуна 1 (див. рисунок 1.7), який закріплений під металевим листом 1 (див. рисунок 1.6 1). При обертанні валу двигуна резиновий ремінь рухається уздовж шківів і відтворює роботу конвеєра виробничої лінії. В лабораторній моделі в якості деталі, що переміщується цим конвеєром, використовується звичайний тенісний шарик 4 (див. рисунок 1.6), який котиться по металевому листу 1, охоплений спеціальним утримувачем у формі розрізаного кільця, що прикріплене пружинами до ременя 3 (див. рисунок 1.6).

Над ременем 3 (див. рисунок 1.6) на вертикальних стійках встановлені чотири пластикові коробочки, які імітують приймальну станцію та три робочі станції виробничої лінії. Шарик-деталь "завантажується" на конвеєр у приймальній станції, потім конвеєр пересуває його під робочу станцію №1, де шарик зупиняється і піднімається спеціальним механізмом всередину моделі робочої станції №1. Після завершення його "обробки", шарик-деталь опускається в утримувач конвеєра і переміщується під модель робочої станції №2. Процес його "обробки" повторюється, після чого він переміщується конвеєром під модель робочої станції №3. Коли "обробка" на цій станції закінчується, то шарик-деталь знову опускається в утримувач конвеєра і котиться ним до отвору 5 у металевому листі 1 (див. рисунок 1.6). Шарик випадає з утримувача в цей отвір, а утримувач конвеєра звільняється для прийому чергового шарика-деталі. Для цього утримувач переміщується під модель приймальної станції, де "завантажується" наступний шарик-деталь і цикл роботи автоматизованої виробничої лінії повторюється.

На рисунку 1.8 показана схема електричних з'єднань технічних засобів автоматизації спеціалізованої стійки №2 лабораторії при реалізації АСУ ТП (SCADA) автоматизованої виробничої лінії №1.

Обладнання спеціалізованої стійки №2 монтується на стінній панелі над лабораторним столом та на поверхні цього столу. На настінній панелі над лабораторним столом монтується процесорний модуль VIPA 314-2BG03 з опцією Profibus-DP Slave, його модуль розширення VIPA 323-1BH00, блок живлення

VIPA 307-1KA00 (24 VDC), перетворювач частоти Lenze та некерований комутатор Ethernet. Через некерований комутатор усе обладнання спеціалізованої

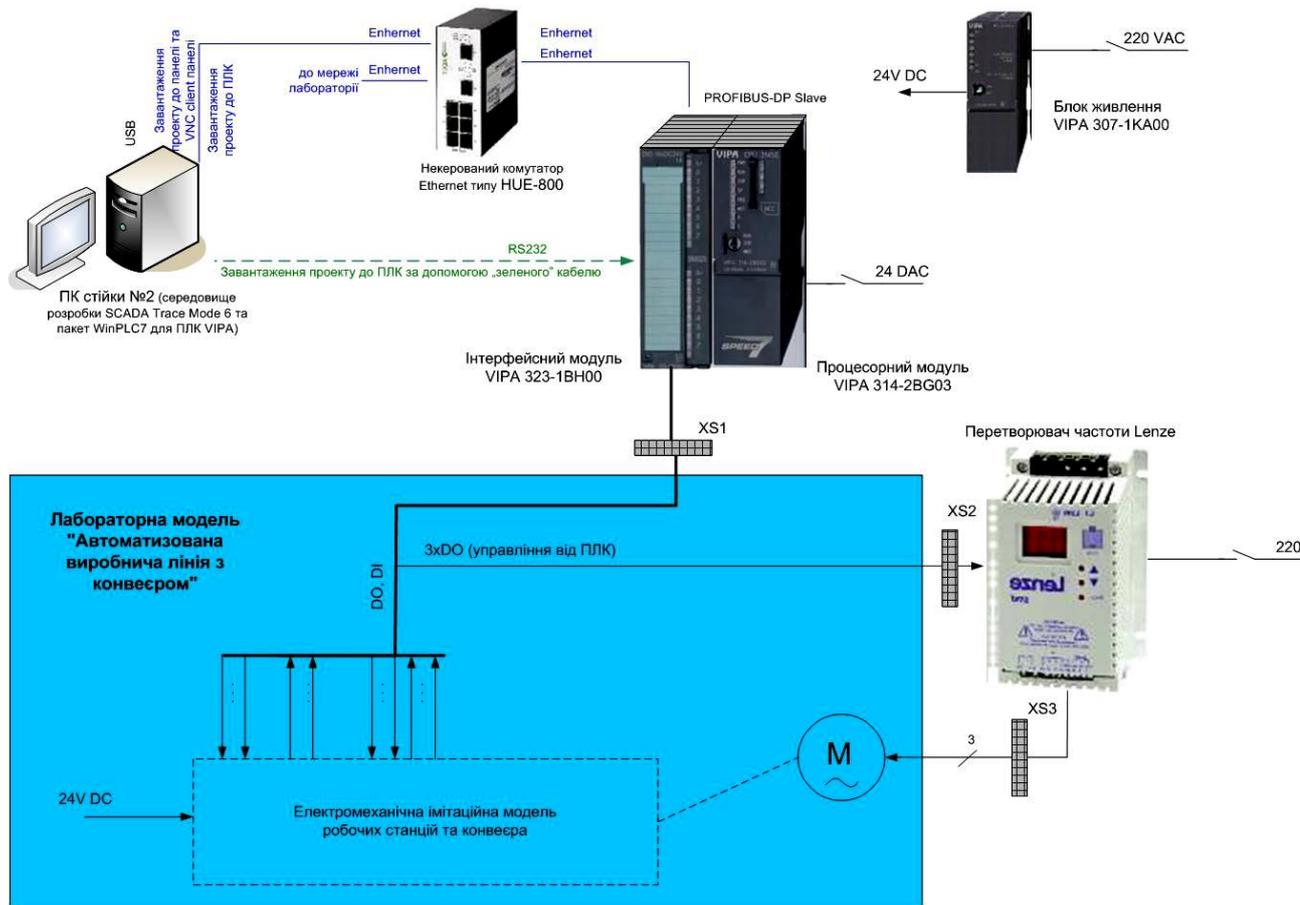


Рисунок 1.8 – Схема електричних з'єднань для реалізації АСУ ТП (SCADA)

стійки №2 зв'язується між собою через мережу Ethernet та підключається до загальної мережі лабораторії. На лабораторному столі біля стійки встановлений ПК стійки №2 та лабораторна модель "Автоматизована виробнича лінія з конвеєром", яка містить асинхронний двигун М та електромеханічну імітаційну модель, що відтворює роботу робочих станцій виробничої лінії та її конвеєра.

Управління лабораторною моделлю здійснюється прикладною програмою ПЛК VIPA, для якого організується програмно-апаратне введення сигналів дискретних датчиків положення та переміщення елементів лабораторної моделі, а

також виведення дискретних сигналів управління елементами цієї моделі та перетворювачем частоти Lenze.

ПК стійки №2 використовується в якості засобу відображення ходу лабораторного дослідження (засобами SCADA Trace Mode 6) і для програмування процесорного модуля «VIPA 314-2BG03».

Лабораторна модель автоматизованої лінії №2 допоміжного виробництва також є електромеханічною імітаційною моделлю реальної виробничої лінії, яка складається з двох верстатів ЧПУ та транспортного робота. Зовнішній вигляд моделі (вид спереду) показаний на рисунку 1.9.

На рисунку 1.10 показаний загальний вигляд (вид збоку) даної лабораторної моделі.

Основою конструкції є прямокутна металева панель 1 (див. рисунок 1.9), що має розмір 440x370 мм<sup>2</sup>. Ця панель кріпиться чотирма гвинтами 5 до звареної вертикальної трубчастої рами 2 (див. рисунок 1.7), яка стоїть на горизонтальній поверхні лабораторного столу, опираючись на горизонтальні упори 9 (див. рисунок 1.9).

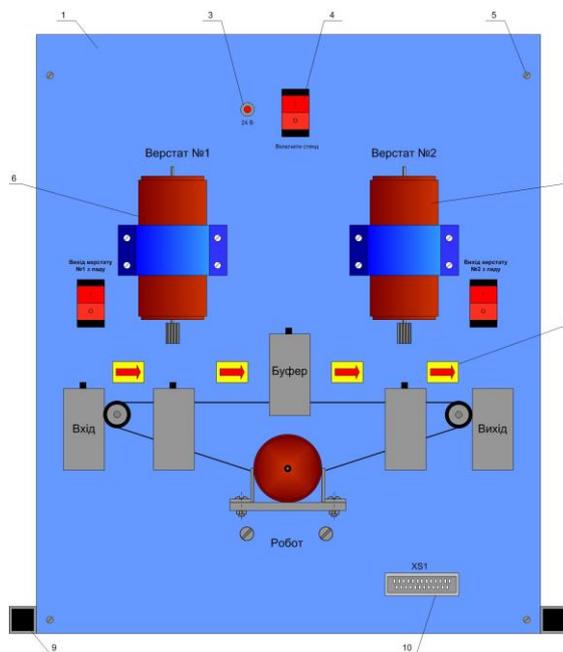


Рисунок 1.9 – Загальний вигляд (вид спереду) лабораторної моделі

У верхній частині металевої панелі 1 (див. рисунок 1.6) на її лицьовій стороні розміщені електричні елементи комутації ланцюгів живлення моделі:

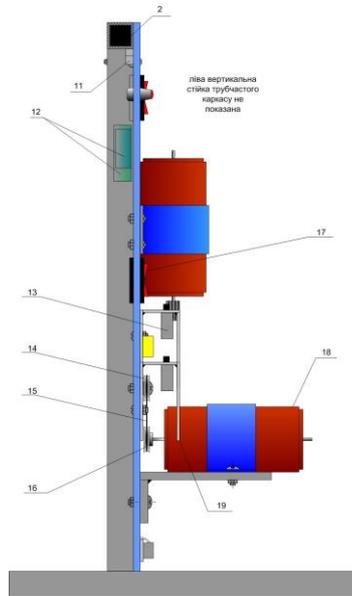


Рисунок 1. 10 – Загальний вигляд (вид збоку) лабораторної моделі

світлосигнальна арматура 3 ("24 В") подачі постійної напруги живлення 24 В на ланцюги лабораторної моделі та перемикач 4 ("Включити стенд") подачі постійної напруги живлення 24 В на ланцюги лабораторної моделі. На задній стороні панелі 1 у її верхній частині закріплені усі реле струму 12 (див. рисунок 1.7) та клемний з'єднувач подачі живлення 11 до ланцюгів елементів лабораторної моделі (мікродвигунів, світлодіодів).

Електроприводи верстатів реальної лінії моделюються за допомогою двох електричних мікродвигунів 6 та 7 (див. рисунок 1.9), а електропривод транспортного робота моделюється електричним мікродвигуном 18 (див. рисунок 10). Перші два мікродвигуна закріплені металевими хомутами безпосередньо на лицьовій стороні панелі, маючи вертикальну орієнтацію. Поруч з ними розміщено два перемикача 17 (див. рисунок 9), що імітують стан виходу з ладу відповідного верстату.

Мікродвигун 18 (див. рисунок 1.10), що кріпиться до спеціального кронштейну, має перпендикулярну орієнтацію по відношенню до металевої

панелі 1. На валу цього мікродвигуна закріплений шків 16, а на лицьовій стороні панелі 1 закріплено ще два шківів 14. Через усі ці шківів перекинутий резиновий трос 15, який при роботі мікродвигуна 18 імітує працюючий транспортний робот.

В лабораторній моделі передбачено п'ять робочих місць деталей – "Вхід", "Під верстатом №1", "Буфер", "Під верстатом №2", "Вихід". Усі ці місця конструктивно виконані у вигляді металевих П-образних кронштейнів 19 (див. рисунок 1.10). Перші чотири робочих місця моделі обладнані кінцевими вимикачами 13, які моделюють реальні датчики положення заготовок на виробничій лінії.

Реальні заготовки, що обробляються виробничою лінією, моделюються за допомогою невеликих металевих циліндрів. Ці моделі заготовок переміщуються вручну з одного їх робочого місця до іншого, що вказується тим чи іншим світловим транспарантом 8 (див. рисунок 1.9), тобто людина при роботі лабораторної моделі виконує функції транспортного робота. Якщо буде вмикатися будь-який транспарант, то одночасно буде вмикатися і мікродвигун 18, що моделює транспортний робот. При цьому треба вручну у встановлений відрізок часу перемістити модель заготовки у нове положення, як того вимагає включений транспарант. Якщо цього не зробити, то таку подію прикладна програма ПЛК VIPA ідентифікуватиме як аварію транспортного робота.

В нижній частині металевої панелі 1 (див. рисунок 1.9) розміщений електричний з'єднувач 10, через який схема лабораторної моделі підключається кабелем до відповідного з'єднувача настінної панелі, що забезпечує сигнальний інтерфейс ПЛК VIPA спеціалізованої стійки №2.

На рисунку 1.11 показана схема електричних з'єднань технічних засобів автоматизації спеціалізованої стійки №2 лабораторії при реалізації АСУ ТП (SCADA) автоматизованої виробничої лінії №2.

Обладнання спеціалізованої стійки №2 монтується на стінній панелі над лабораторним столом та на поверхні цього столу. На настінній панелі над лабораторним столом монтується процесорний модуль VIPA 314-2BG03 з опцією Profibus-DP Slave, його модуль розширення VIPA 323-1BH00, блок живлення VIPA 307-1KA00 (24 VDC) та некерований комутатор Ethernet. Через некерований

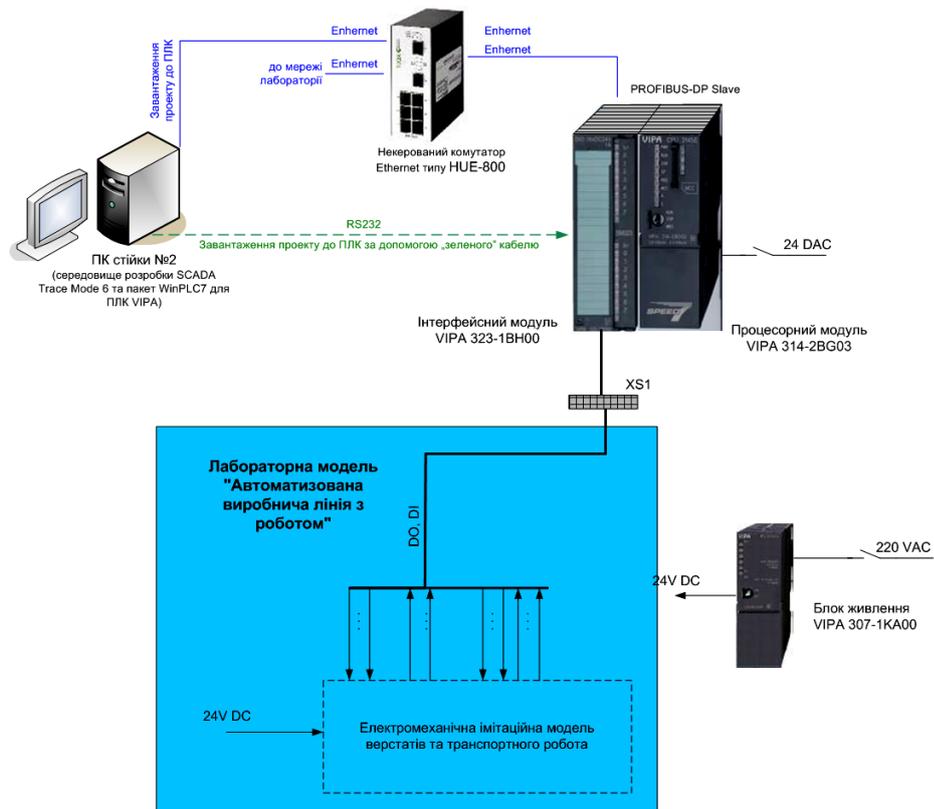


Рисунок 1.11 – Схема електричних з'єднань для реалізації АСУ ТП (SCADA)

комутатор усе обладнання спеціалізованої стійки №2 зв'язується між собою через мережу Ethernet та підключається до загальної мережі лабораторії. На лабораторному столі встановлений ПК стійки №2 та лабораторна модель "Автоматизована виробнича лінія з роботом", яка містить електромеханічну імітаційну модель, що відтворює роботу верстатів виробничої лінії та її робота.

Управління лабораторною моделлю здійснюється прикладною програмою ПЛК VIPA, для якого організується програмно-апаратне введення сигналів дискретних датчиків положення та переміщення елементів лабораторної моделі, а також виведення дискретних сигналів управління елементами цієї моделі.

ПК стійки №2 використовується в якості засобу відображення ходу лабораторного дослідження (засобами SCADA Trace Mode 6) і для програмування процесорного модуля «VIPA 314-2BG03».

У 2021 році конструктивне рішення всього «віртуального виробництва», було змінено шляхом додавання різноманітних імітаційних моделей матеріальних потоків у вигляді трубопроводів та конвеєрів, які «зв'язують» фізичні та

імітаційні моделі технологічного обладнання.

На рисунку 1.12 наведена схема матеріальних потоків «віртуального виробництва», які здійснюються конвеєрами (світлові імітаційні моделі).

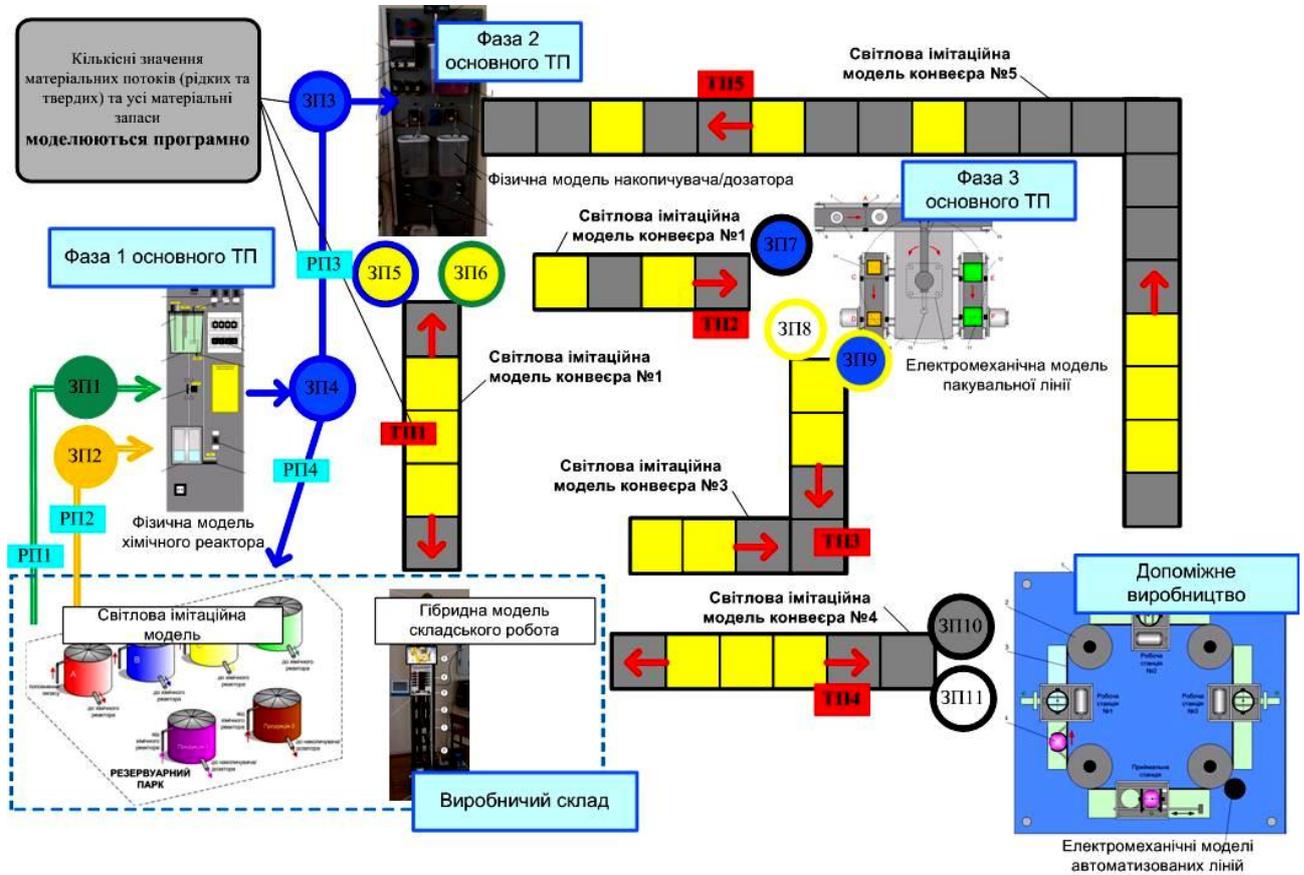


Рисунок 1.12 – Моделювання конвеєрів на «віртуальному виробництві»

Як видно з рисунку, п'ять конвеєрів реального працюючого підприємства замінені в його лабораторній імітації світловими імітаційними моделями, які утворюються ланцюгами світлових елементів. Вмикання такого світлового елемента у моделі конвеєра буде імітувати розміщення якогось твердого матеріального ресурсу на стрічці конвеєра. Якщо ці світлові елементи будуть загорятися та гаснути один за одним, то це утворить наочну імітацію переміщення даного матеріального ресурсу по конвеєру.

При цьому імітуються різні види матеріального ресурсу, що переміщуються конвеєром. Наприклад, якщо буде вмикатися та поступово "переміщатися" тільки один світловий елемент, то це буде імітувати поштучне

переміщення таких матеріальних ресурсів як пусті та наповнені банки. Якщо ж одночасно вмикати та "переміщати" два світлових елементи, то це може імітувати переміщення конвеєром таких матеріальних ресурсів як пусті та заповнені коробки. Якщо ж одночасно вмикати та "переміщати" три світлових елементи, то це може імітувати переміщення конвеєром палет різних матеріальних ресурсів – пустої тари, наповнених банок, пустих та заповнених коробок, матеріалів та заготівок..

На схемі також відмічене, що усі значення матеріальних потоків за локальних матеріальних запасів «віртуального виробництва» моделюються програмним шляхом.

На рисунку 1.13 показаний план приміщення лабораторії «Промислова мікропроцесорна техніка», на якому також означений спосіб з'єднання окремих конструкцій конвеєрів в єдине ціле.

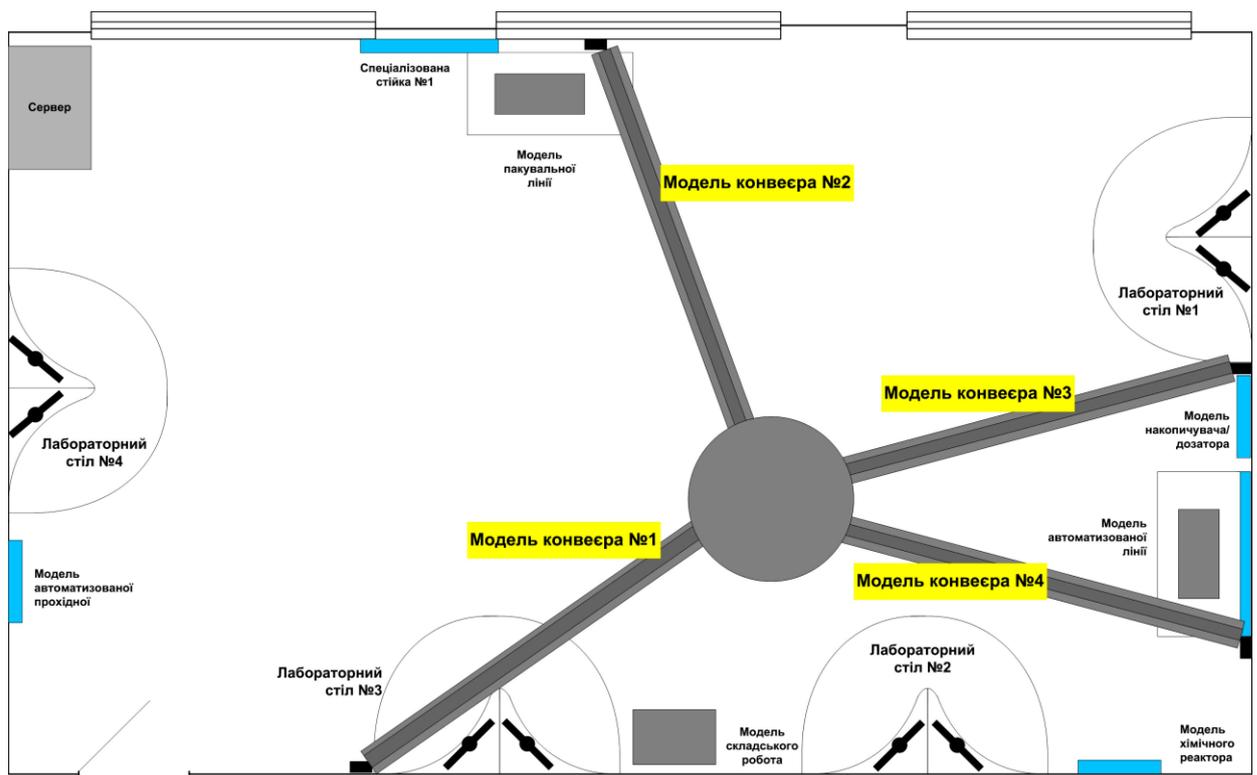


Рисунок 1.13 – Проект розміщення моделей конвеєрів в приміщенні лабораторії

Як видно з рисунку, однакові за довжиною моделі конвеєрів при

об'єднанні їх в єдину конструкцію зміщують положення центрального елемента, тобто маршрутизатора, з осі симетрії приміщення. Також на рисунку видні вертикальні металеві стойки, встановлені біля стін лабораторії, на які опираються конструкції кожної моделі конвеєра.

### **1.3 Цифрова трансформація аналогічних технологічних процесів**

У світовій практиці вже накопичився великий досвід щодо цифрової трансформації аналогічних технологічних процесів. Основною метою таких змін, як правило, є підвищення ефективності процесу (зменшення витрат, підвищення продуктивності та якості продукту), поліпшення адаптації процесу до швидких змін виробничого завдання, підвищення надійності та ефективності обладнання, а також збільшення інформаційної прозорості процесу.

Так, одним зі шляхів цифрової трансформації допоміжного виробництва, побудованого на основі автоматизованих виробничих ліній, є впровадження дистанційного моніторингу виробництва [15]. При цьому технологія IoT використовується для відстеження стану технологічних процесів і виробничого обладнання, відновлення програмного забезпечення, дозволяючи здійснювати його дистанційний моніторинг. Це може бути корисно сервісним службам і аутсорсінговим компаніям для здійснення діагностики й предиктивного техобслуговування, контролю якості й так далі. Застосування технології збору даних з датчиків і пристроїв АСУ ТП у режимі реального часу для цих цілей не є новим й з успіхом вже використовується в сучасних PLM-системах і системах керування виробничими активами (Asset Management). Але впровадження елементів IoT, створених для конкретного виробництва, може забезпечувати навіть реалізацію полегшеного варіанта MES на рівні цеху або виробничої ділянки, або, наприклад, надавати можливість моніторингу виробничих процесів із центрального порталу компанії (рисунок 1.14).

Необхідність оптимізації етапів життєвого циклу виробів допоміжного виробництва приводить до розв'язання ряду супутніх задач, орієнтованих на

розробку нових підходів до створення виробничих комплексів підприємств майбутнього, що підтримують інтеграцію технологічних, технічних, програмних і інших засобів і систем, що автоматизують етапи розробки й виготовлення виробів. Такими системами, призначеними для роботи на підприємствах майбутнього, є кіберфізичні системи [15].



Рисунок 1.14 – Дистанційний моніторинг стану обладнання за допомогою ІоТ

В основі організації виробничих підприємств Індустрії 4.0 типу «розумна фабрика» лежать технології промислового Інтернету речей, хмарні технології, технології збору й обробки великих масивів виробничих даних і ін., що забезпечують роботу роботизованого автоматичного технологічного обладнання - кіберфізичних систем [19].

Схема взаємодії персоналу й кіберфізичних систем на виробничому підприємстві наведена на рисунок 1.15. Як випливає з аналізу рисунка, керування обладнанням персонал здійснює віддаленим способом за допомогою засобів обчислювальної техніки (персональний комп'ютер - ПК, планшет, телефон та ін.), підключених до бездротової мережі промислового Інтернету речей (ІоТ - Internet of Things).

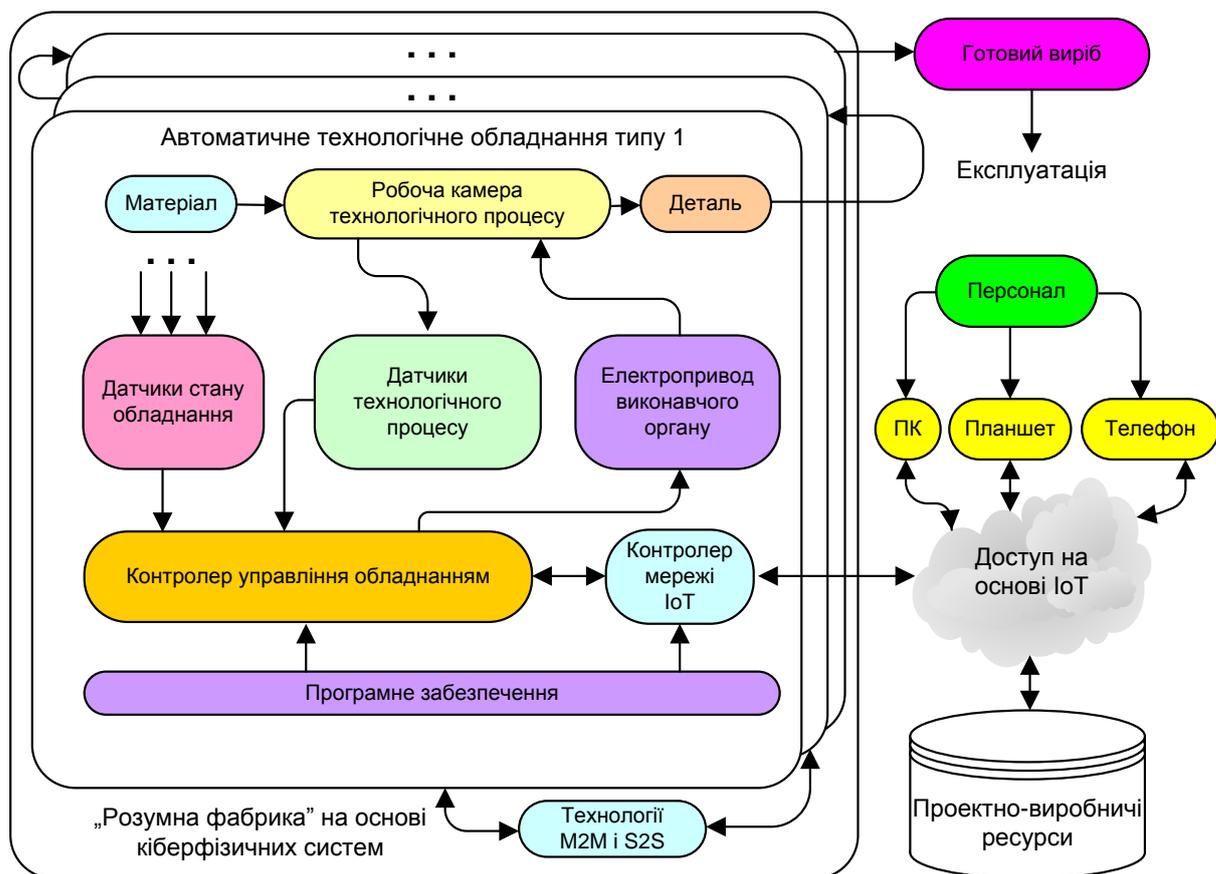


Рисунок 1.15 – Схема взаємодії персоналу й кіберфізичних систем на підприємствах Індустрії 4.0 типу «розумна фабрика»

Інтерфейс IoT підтримується різними специфікаціями бездротових мереж. Найбільше поширення на практиці отримали специфікації Bluetooth, Wi-Fi і ін. Основний недолік цих і ряду інших протоколів передачі виробничих даних у бездротових мережах полягає в обмеженій дальності поширення радіосигналів між абонентами мережі, внаслідок чого на практиці для організації безперебійної роботи технологічного обладнання протяжних виробничих ліній задіюються роутери.

З боку персоналу технології бездротових мереж підтримуються на апаратно-програмному рівні користувальницьким обладнанням (ПК, планшет, телефон), що створює передумови для організації «безлюдного» виробництва, управління яким забезпечується дистанційно. Як приклад практичної реалізації дистанційного способу управління компонентом кіберфізичної системи можна привести спосіб управління 3D-принтерами, установленими на виробництві

одного підприємства (ділянки), виробничим персоналом, територіально розміщеним у корпусах іншого виробничого підприємства, що входять до складу однієї корпорації. Очевидно, що технологічне обладнання (3D-принтери) доцільно розміщати в безпосередній близькості від підприємства, що формує сировину (металеву пудру, що спекається в робочій камері 3D-принтера) для роботи цифрових підприємств, що підтримують адитивні технології. При цьому управлінський персонал підприємства може територіально розташовуватися в іншому регіоні країни, контролюючи стан процесів на підприємстві по інтерфейсах IoT із застосуванням «хмарних» технологій.

З боку технологічного обладнання кіберфізичних систем на фізичному рівні протоколи бездротового зв'язку підтримуються убудованими у виробничі автомати контролерами мережі IoT. Кожний виробничий автомат оснащений персональним контролером мережі IoT. Виробничі дані, передані від кіберфізичної системи персоналу «розумної фабрики», включають:

- стан виконання технологічного процесу в робочій камері виробничого автомата (наприклад, установлення на друковані плати елементної бази, промивання друкованих плат, нанесення гальванічного покриття на деталі, отримані методом тривимірного друку й ін.), що реєструється спеціальною системою убудованих датчиків;

- стан технологічного обладнання, що виконує виробничу операцію (наприклад, стан справності; залишок сировини чи компонентів, необхідних для виконання технологічної операції й ін.);

- необхідність заміни інструмента, проведення регламентних і попереджувальних робіт з технічного обслуговування обладнання й т.д.), що реєструється спеціальною системою убудованих датчиків.

Попередню обробку даних від датчиків стану технологічного обладнання й датчиків виконання технологічних операцій забезпечує убудований контролер управління, що здійснює інформаційний обмін з контролером IoT.

Для забезпечення роботи виробничого автомата по заданій програмі контролер управління встаткуванням забезпечує формування необхідних команд

управління на електропривод виконавчого елемента, що виконує необхідну виробничу операцію. Таким чином, «робоча камера - датчик - контролер управління - електропривод» утворюють замкнутий контур цифрової автоматичної системи управління [10], що забезпечує виконання заданих технологічних операцій в автоматичному режимі.

Інформаційні процеси, що циркулюють у цьому замкнутому контурі, стають доступні персоналу виробничого підприємства за рахунок обміну, підтримуваного контролером IoT. Ці процеси становлять інтерес для персоналу тільки у випадку виникнення позаштатних ситуацій у роботі обладнання, щоб з'ясувати час і причину її виникнення (наприклад, поломка, порушення технологічного процесу та ін.). У той же час дані від датчика стану технологічного обладнання представляють для персоналу постійний інтерес, тому що від справності обладнання, підтримки запасу інструмента й сировини усередині виробничого автомата на заданому рівні та ін. залежить успіх виконання всієї програми випуску підприємства.

Очевидно, що в персоналу виробничого підприємства у випадку виникнення позаштатних ситуацій у роботі автоматичного обладнання, що виявляються в процесі моніторингу, повинні бути в розпорядженні стандартизовані й затверджені відповідними інструкціями алгоритми реагування, показані на рисунку 1.15 бібліотекою «проектно-виробничі ресурси», доступні по інтерфейсах IoT фахівцям «розумної фабрики».

Взаємодія окремих компонентів кіберфізичних систем у складі єдиної виробничої лінії здійснюється на основі схеми (технологій) M2M и S2S, тобто Machine-to-Machine і Systems-to-Systems відповідно. Приклад схеми руху складальних одиниць на підприємствах Індустрії 4.0 типу «розумна фабрика» наведений на рисунку 1.16.

Кожна виробнича лінія складається з набору автоматичного технологічного обладнання, що виконує набір операцій зі складальними одиницями. Залежно від призначення виробничих автоматів це можуть бути, наприклад:

- технологічні операції по установленню компонентів елементної бази на друковані плати;
- операції промивання друкованих плат після монтажу;
- операції рентгенологічного контролю якості поверхневого монтажу компонентів;
- операції ультрафіолетового затвердіння вологозахисного покриття (лаку);
- операції нанесення антикорозійного гальванічного покриття на металеві деталі;
- операції складання модуля з набору деталей і друкованої плати із установленими компонентами та ін.

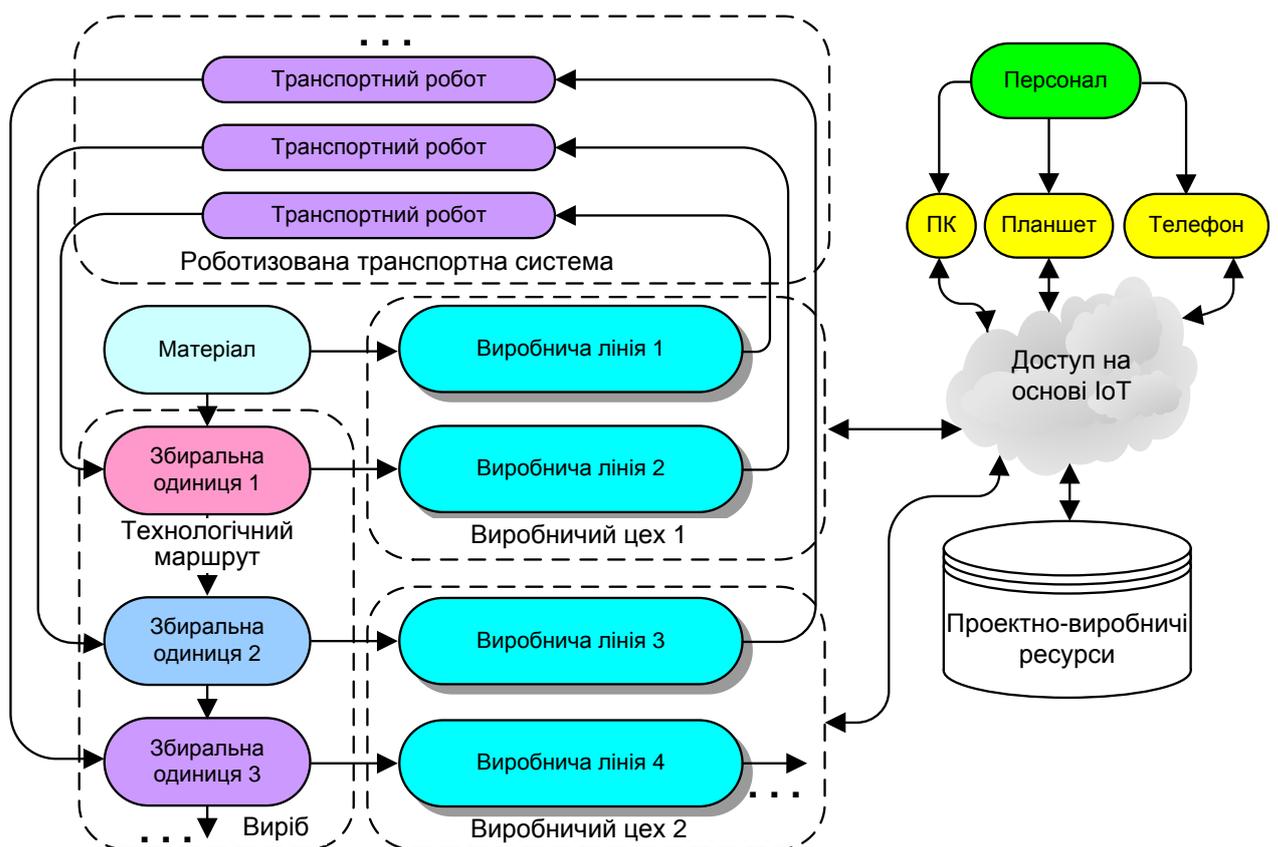


Рисунок 1.16 – Схема руху складальних одиниць на підприємствах Індустрії 4.0 типу «розумна фабрика»

Сукупність виробничих ліній утворює виробничий цех, що спеціалізується на виконанні певних технологічних операцій. Послідовність технологічних операцій, виконуваних у процесі виготовлення виробу, утворює технологічний маршрут виготовлення виробу. Якщо технологічний маршрут виготовлення виробу припускає виконання з деталями (складальними одиницями) технологічних операцій на обладнанні різних виробничих ліній, то переміщення деталей у межах цеху повинне забезпечуватися спеціалізованою роботизованою транспортною системою.

Роботизована транспортна система включає набір транспортних роботів, що підтримують обмін виробничими даними по бездротовій мережі IoT і призначених для доставки деталей (складальних одиниць, готового виробу) зі складу готової продукції або на склад тимчасового зберігання, а також для подачі (знімання) деталей у приймальні (вихідні) контейнери виробничих автоматів, що виконують технологічні операції.

Таким чином, транспортні роботи можуть бути внутріцеховими (переміщують деталі в межах виробничих ліній і системи шаф внутріцехового зберігання виробів) і міжцеховими, призначеними для переміщення виробів відповідно до технологічного маршруту в межах усього виробничого комплексу підприємства Індустрії 4.0.

Моніторинг діяльності виробничих автоматів на підприємствах Індустрії 4.0 типу «розумна фабрика» забезпечується обслуговуючим персоналом, що здійснює контроль за станом обладнання й технологічних процесів виготовлення, за допомогою комунікаційних пристроїв (ПК, планшет, телефон), підключених до бездротової мережі по протоколах IoT.

Аналіз рисунку 1.16 показує, що базове виробниче обладнання, розміщене на підприємстві Індустрії 4.0 типу «розумна фабрика», є максимально універсальним, тобто дозволяє за досить короткий термін переорієнтувати (перепрограмувати) виробничі потужності підприємства для початку випуску нового виду виробів без істотних змін існуючої структури виробництва.

Властивість апаратної інваріантності виробничих комплексів, оснащених кіберфізичними системами, визначає принцип і можливості самоорганізації

виробничих цехів як у частині зміни номенклатури виробів, що виготовляються, так і в частині запобігання відмов і несправностей, що виникають в обладнанні виробничих ліній. Такі алгоритми самоорганізації виробничого обладнання умовно показані на рисунку 1.16 у вигляді бібліотеки «проектно-виробничі ресурси», підключеної із «хмари» до інтерфейсу IoT виробничого комплексу.

Принцип роботи кіберфізичних систем на виробничих підприємствах Індустрії 4.0 доцільно розглянути на прикладі функціональної схеми, показаної на рисунку 1.17. Вихідними даними для початку роботи виробничого автомата (наприклад, 3D-принтера, що функціонує за адитивними технологіями) є сировина (матеріал), з якої необхідно виготовити деталь, і керуюча програма, що відповідає цифровій моделі виробу (конструкторської і програмної документації, відповідно, КД і ПД).

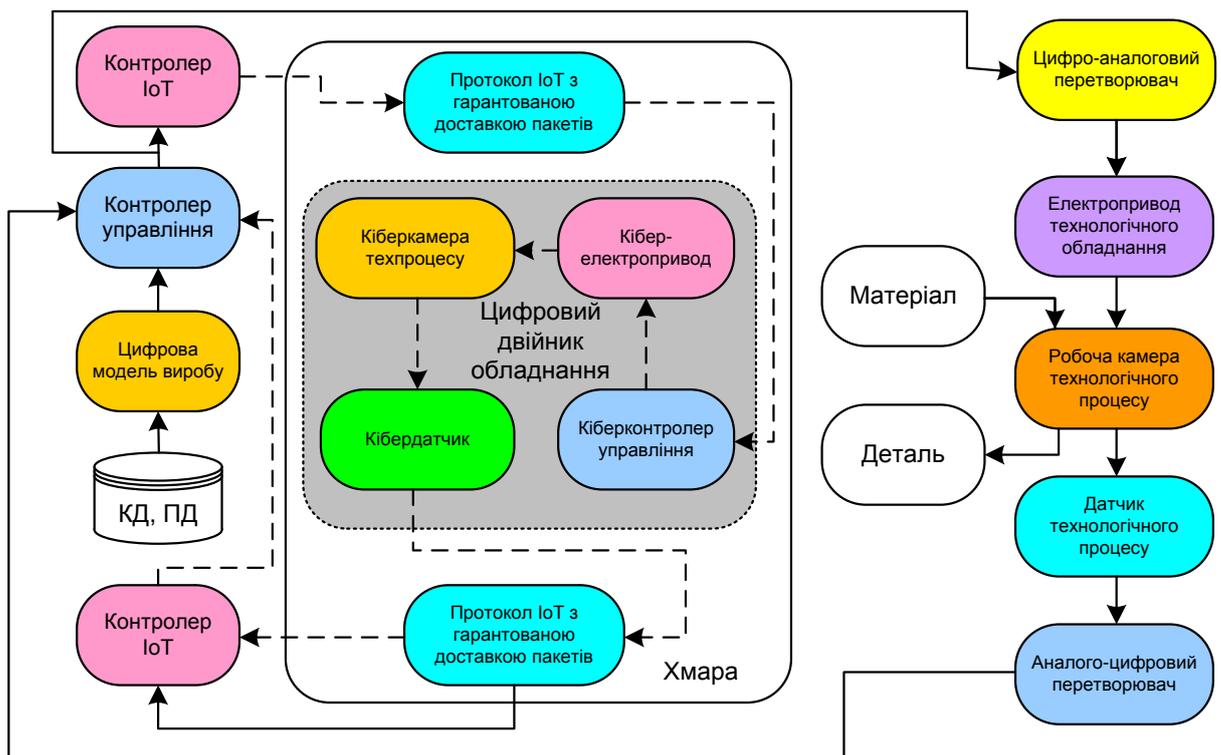


Рисунок 1.17 – Функціональна схема цифрової системи управління кіберфізичним обладнанням на підприємствах Індустрії 4.0 типу «розумна фабрика»

На підставі вихідних даних контролер управління формує керуючі команди на цифро-аналоговий перетворювач і на контролер IoT. Команди для цифро-аналогового перетворювача призначені для видачі сигналів управління на електропривод (двигун, до якого через систему редукторів, що працюють на зубчастій передачі, приєднані інструменти) для виконання технологічної операції. Команди управління на контролер IoT призначені для передачі сигналів управління на кібернетичний контролер управління цифрового двійника технологічного обладнання.

Цифровий двійник технологічного обладнання - це спеціальний компонент кіберфізичної системи, що представляє собою математичну модель виробничого автомата, що адекватно реальному пристрою описує принцип і характеристики його роботи й розміщується в «хмарі» (рівень сервісів IoT). Наявність цифрового двійника обладнання на рівні фізичних пристроїв дозволяє здійснювати додатковий контроль якості виконання виробничих операцій, а на кібернетичному рівні дозволяє проводити імітаційне моделювання процесів виготовлення виробу на етапах, коли цифровий завод ще тільки проектується або розробляються технологічні маршрути виготовлення виробу нового типу, який запланований до постановки на виробництво.

Електропривод технологічного обладнання виконує задану виробничу операцію (наприклад, установлення компонентів поверхневого монтажу на друковані плати) у робочій камері технологічного процесу. Контроль виконання технологічних операцій здійснюється в автоматичному режимі за допомогою сенсорної системи на основі датчика стану виконання виробничих процесів. У закордонній літературі такий підхід до організації процесів збору виробничих даних прийнято називати «технологіями сенсорики» (від англ. sensor - датчик). Як правило, датчики технологічних операцій - аналогові датчики, і для передачі обмірюваних величин, що характеризують стан технологічного процесу, у цифровий контролер управління потрібне виконання операції аналого-цифрового перетворення цих даних.

Паралельно з виконанням реального технологічного процесу на фізичному рівні здійснюється обчислення параметрів математичної моделі технологічного

процесу для цифрового двійника технологічного обладнання, що включає підсистему кібернетичного електроприводу, підсистему кібернетичного датчика й кібернетичної камери, у якій імітується виконання реальної технологічної операції. Процеси обчислення параметрів математичної моделі технологічних процесів реалізуються на кібернетичному рівні. Результати обчислень через контролер IoT також передаються в контролер управління технологічного обладнання. Таким чином, алгоритму роботи виробничого автомата, реалізованому у вигляді програмного забезпечення кіберфізичної системи, доступні:

- значення, видані на електропривод технологічного обладнання для виконання технологічної операції;
- обмірювані значення, що відповідають стану виконання технологічної операції в робочій камері;
- оцінені (очікувані) значення результату виконання технологічної операції, отримані в процесі розрахунку математичної моделі, що описує технологічну операцію адекватно реальному технологічному процесу.

За результатами порівняння обмірюваних у фізичному світі й оцінених у кібернетичному світі значень контролер управління кіберфізичної системи ухвалює рішення щодо відповідності виконуваної технологічної операції заданому алгоритму. При мінімізації кванта часу, що характеризує дискретність частоти опитування сенсорної системи, представляється можливим організувати на виробництві Індустрії 4.0 «реальний час» для контуру виконання технологічних операцій у робочих камерах кіберфізичних систем.

Також на допоміжному виробництві можна з успіхом застосувати 3D-друк – технологію, що швидко розвивається й незмінно зростає [10]. Вона вже зарекомендувала себе як ефективний метод створення передових продуктів і буде грати все більшу роль у виробництві з розвитком цифровізації й переходом до моделі Індустрії 4.0.

Виготовлення кінцевих серійних виробів з металів уже активно застосовується такими великими компаніями, як General Electric, Airbus, Boeing,

BMW, Michelin, а з появою надпотужних машин типу SLM NXG XII 600 масове адитивне виробництво стає реалією не настільки віддаленого майбутнього.

Принцип роботи переважної більшості сучасних 3D-принтерів по металу заснований на розплавленні порошків у заздалегідь сформованому шарі (Powder Bed Fusion), звичайно за допомогою потужного лазера.

Помилково думати, що 3D-друк покликаний замінити лиття або інші класичні процеси. Вона допомагає вирішити специфічні задачі, які нездійсненні або занадто трудомісткі при використанні традиційних технологій, наприклад:

- виготовлення унікальних деталей складної геометрії, у тому числі дрібних деталей, виробів із внутрішніми порожнинами й каналами, тонкими стінками й т.п.;

- зниження ваги виробів;

- скорочення числа одиниць у складанні;

- створення ніздрюватих структур.

Такі можливості забезпечує топологічна оптимізація: проектувальники можуть створювати практично будь-яку геометрію.

3D-друк варто сприймати як ще один варіант технології одержання виробів поряд з механічною й пластичною обробкою, литтям і ін. При виборі варіантів виробничого процесу треба ретельно зважити всі «за» і «проти».

Технологія SLM дозволяє значно скоротити цикл виробництва виробу. З одного боку, коли враховувати вартість матеріалів, то адитивне виробництво виходить дорожче. Але якщо враховувати всі економічні фактори, починаючи зі скорочення споживання електроенергії й кінчаючи зменшенням податкового навантаження, 3D-друк допомагає заощадити досить серйозні кошти.

Крім того, технологія дає можливість різко знизити коефіцієнт Buy-to-Fly, тобто співвідношення між кількістю закупленого матеріалу й кількістю матеріалу в готовій деталі.

Історично сформованим галузевим стандартом обладнання на базі селективного лазерного плавлення є платформа розміром 250 x 250 мм із висотою побудови 250-300 мм.

На сьогодні самі великі камери побудови в адитивних установок SLM Solutions. У системи SLM 800 камера 500 x 280 x 850 мм, у новітньої машини SLM NXG XII 600 - 600 x 600 x 600 мм.

#### 4.4 Розробка архітектури нових навчальних засобів

У світовій практиці процес цифрової трансформації у промисловій області давно і активно обговорюється фахівцями та експертами [20-24]. Вже сформоване загальне бачення тих цілей, які ставлять виробники на шляху вдосконалення своїх підприємств (рисунок 1.18) [24].



Рисунок 1.18 – Основні цілі вдосконалення промислових підприємств

Їх три:

- необхідно охопити нові групи користувачів (споживачів) та нові ринки;
- необхідно зменшити витрати та збільшити ефективність;
- пристосуватися до зростаючої конкуренції.

Тому цифрові рішення, закладені в концепцію трансформації виробництва у «розумне» виробництво Індустрії 4.0, породжують для досягнення означених цілей відповідні очікування (рисунок 1.19):

- оптимізувати внутрішні процеси;
- поліпшити цифровий досвід споживачів;
- створити нові цифрові бізнес-моделі;
- створити нові кадрові та інноваційні організації та культури;
- створити нові бар'єрні мережі та цифрові екосистеми.



Рисунок 1.19 – Основні очікування виробників від цифрової трансформації

Проте, на шляху впровадження нових цифрових рішень у виробництво зараз існує декілька основних завад (рисунок 1.20):



Рисунок 1.20 – Основні причини гальмування цифрової трансформації

- людський фактор (не бачать необхідності в ЦТ, для них це занадто складно, ще не готові до нових змін; стосується і керівників, і звичайних робітників);

- відсутність інноваційної культури в компанії;

- складність розробки бізнес планів щодо нововведень;

- відсутність належної організації у використанні наявних даних виробництва для покращення його функціонування;

- несумісність традиційних показників ефективності виробництва (KPI) з новою ідеологією цифрового виробництва.

Проте, як правило, виробники не вказують проблемою впровадження цифрової трансформації на відсутність відповідних технологій на виробництві. Тобто вони не приділяють технологіям належної уваги, а дарма.

На рисунку 1.21 показані ті сучасні цифрові технології, які можуть зробити виробництво набагато ефективнішим. На цьому рисунку показаний відсоток передових компаній, які вважають ту чи іншу технологію дуже важливою для своєї цифрової трансформації.

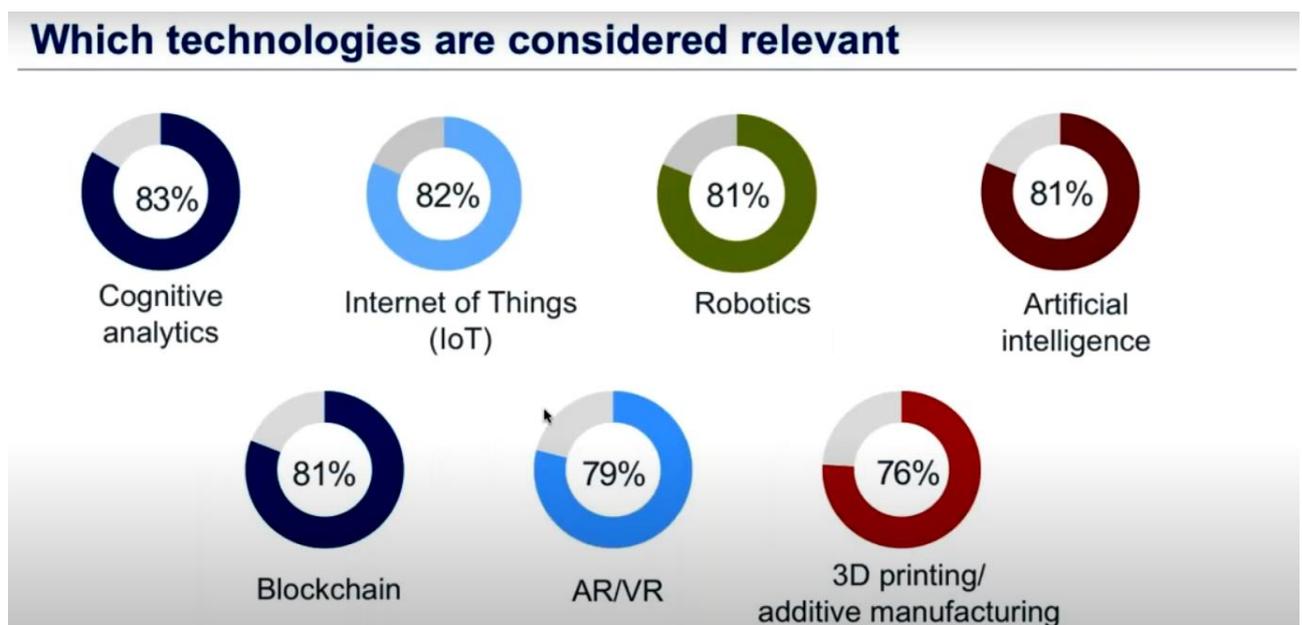


Рисунок 1.21 – Основні цифрові технології для вдосконалення виробництва

Яка ж повинна бути загальна стратегія зазначено цифрової трансформації виробництва? На рисунку 1.22 показаний рекомендований шлях цифрової трансформації, який означає основні її стадії:

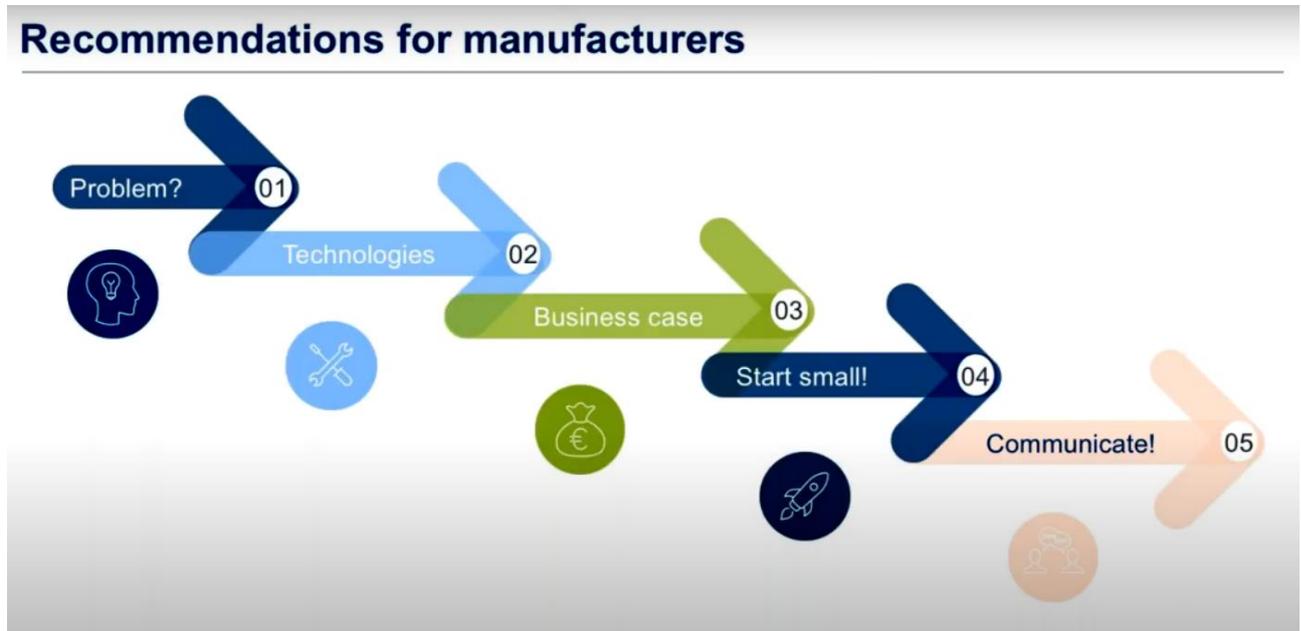


Рисунок 1.22 – Оптимальна стратегія цифрової трансформації виробництва

- виявлення існуючої на виробництві проблеми;
- вибір тих сучасних цифрових технологій, які здатні вирішити наявну проблему;
- розроблення бізнес-плану щодо потрібних інновацій, який включатиме концепцію цифрової трансформації виробництва;
- виконання невеликого проєкту цифрової трансформації, його впровадження та отримання найшвидшого позитивного результату;
- оприлюднення для всіх працівників підприємства досягнутих позитивних результатів, що заохотить їх до виконання подальшої більш складної цифрової трансформації виробництва.

Саме ця стратегія і була покладена в основу розробки архітектури нових комп'ютеризованих навчальних засобів (НЗ) для дослідження цифрової трансформації допоміжного виробництва (рисунок 1.23 та додаток А).

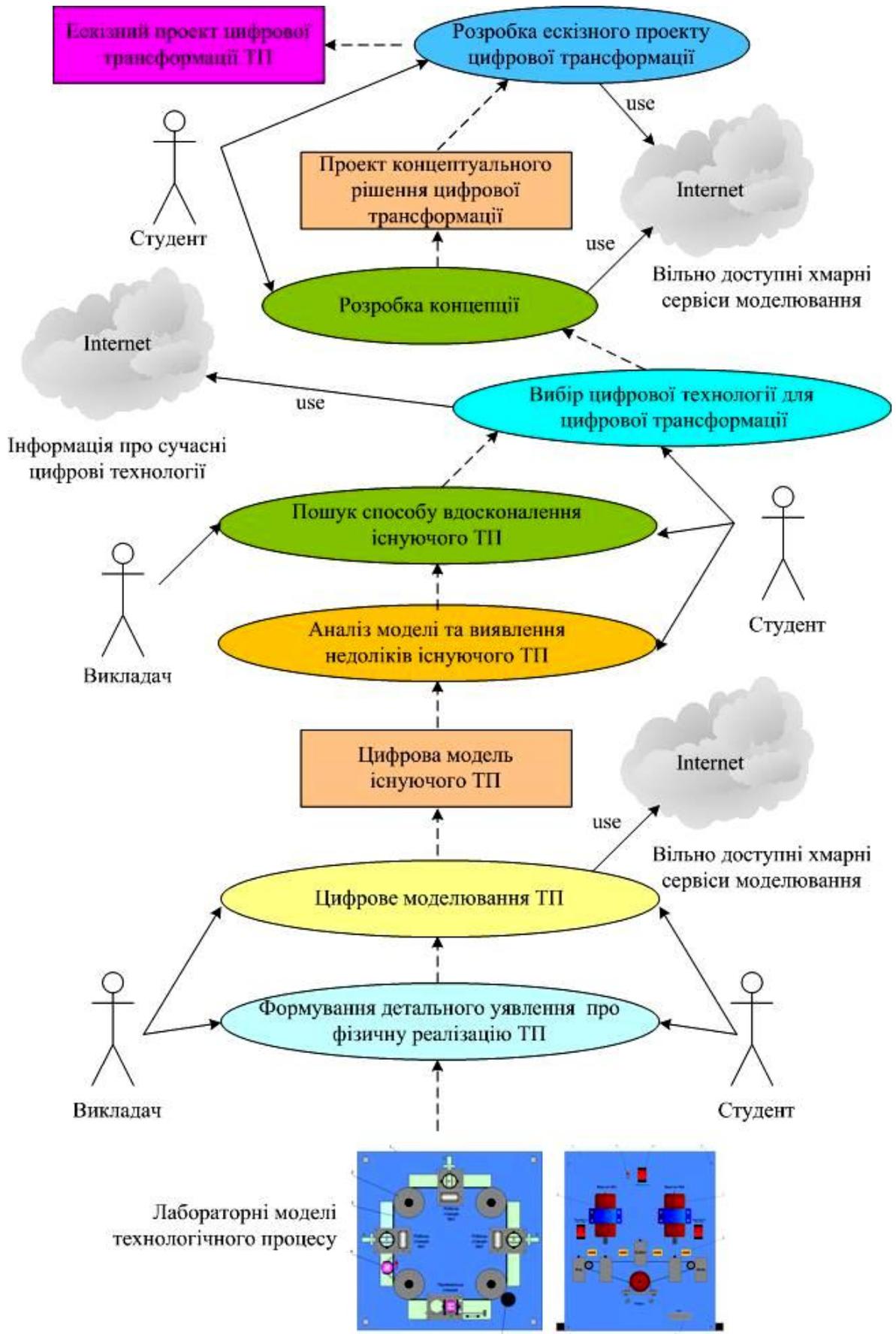


Рисунок 1.23 – Загальна архітектура комп’ютеризованих НЗ

Основою загальної архітектурного рішення нових НЗ є фізична модель технологічного процесу (ТП) допоміжного виробництва, яка вбудована у імітаційну модель «віртуального виробництва» лабораторії «Промислова мікропроцесорна техніка» ФПТА, а також програмно-технічна імітаційна модель інтегрованої автоматизованої системи управління (ІАСУ) «віртуальним виробництвом» в цілому та окремими його технологічними процесами.

На початковому етапі першої стадії цифрової трансформації технологічного процесу необхідно на вказаній основі сформулювати вихідне уявлення про можливу реалізацію на реальному виробничому підприємстві даного автоматизованого ТП. Це уявлення формується у свідомості студента як самостійно, так і за допомогою викладача.

Після того, як сформоване це вихідне уявлення, можна виконувати наступний етап першої стадії цифрової трансформації – комп'ютерне моделювання статичної та динамічної реальності автоматизованого ТП з метою формування більш повного та детального уявлення його можливої реалізації на реальному виробничому підприємстві. При комп'ютерному моделюванні застосовуються як наявні локальні програмні засоби моделювання, так і доступні хмарні сервіси цифрового моделювання. Розробка цих комп'ютерних моделей здійснюється як студентом за індивідуальним завданням в рамках окремих професійних дисциплін або проектного практикуму, так і викладачем при підготовці навчально-методичних матеріалів цих професійних дисциплін або проектного практикуму. В результаті таких дій розробляється повний комплект комп'ютерних моделей можливої реалізації автоматизованого ТП на реальному виробничому підприємстві. При виконанні наступних стадій цифрової трансформації цей комплект моделей має бути доступним для перегляду студентом як на комп'ютерах лабораторії, так і на домашньому комп'ютері.

Після цього студент переходить до наступної стадії цифрової трансформації, під час якої він досліджує комплект комп'ютерних моделей можливої реалізації автоматизованого ТП на реальному виробничому підприємстві з метою визначення тих чи інших недоліків такої реалізації, які в подальшому можна буде усунути шляхом її цифрової трансформації. З усіх

знайдених недоліків студент (або викладач) обґрунтовано вибирає найбільш важливий і переходить до пошуку способу вдосконалення реального автоматизованого ТП, що призведе до усунення цього недоліку. Такий пошук студент може виконувати за участі викладача, який надаватиме додаткові консультації та роз'яснення.

Після того, як буде намічені шляхи вдосконалення реального автоматизованого ТП, студент переходить до виконання наступної стадії цифрової трансформації – вибір та обґрунтування тієї сучасної технології або технологій в рамках концепції «Індустрія 4.0» для реалізації наміченого вдосконалення реального автоматизованого ТП. При цьому студент обов'язково здійснює пошук на відповідних ресурсах Інтернет найновішої інформації у даній предметній області та її ретельний аналіз.

Коли потрібна технологія або технології цифрової трансформації знайдені, студент переходить до виконання наступної стадії цифрової трансформації – розробка концепції цифрової трансформації реального автоматизованого ТП, використовуючи при цьому як доступні хмарні сервіси цифрового моделювання, так і наявні локальні програмні засоби моделювання. Готовий проєкт, що відображає запропоноване концептуальне рішення цифрової трансформації реального автоматизованого ТП, є першим результатом практичного освоєння студентом процесу цифрової трансформації. Цей результат може бути отриманий на рівні бакалаврської підготовки студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», наприклад, в рамках дисципліни «Кіберфізичні системи автоматизації виробництва».

На основі готового проєкту концептуального рішення цифрової трансформації студент може продовжити проєктування на нових НЗ і перейти до наступної стадії – розробка ескізного проєкту цифрової трансформації реального автоматизованого ТП. Цей етап характеризується більшою деталізацією проєктних рішень і також передбачає активне використання студентом як доступних хмарних сервісів цифрового моделювання (наприклад з технічною анімацією динаміки трансформованого автоматизованого ТП), так і наявних програмних засобів моделювання. Результатом робіт цієї стадії є ескізний проєкт

цифрової трансформації реального автоматизованого ТП, який представлений, наприклад, у вигляді відповідної цифрової моделі його можливої реалізації на реальному «розумному» підприємстві. Бажано, щоб функціонування цієї моделі можна було переглядати або на комп'ютері лабораторії, або через доступні хмарні додатки цифрового моделювання, або через локальні програмні засоби моделювання.

Такий ескізний проєкт може бути результатом практичного освоєння процесу цифрової трансформації магістрами спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», наприклад, в рамках дисципліни «Промисловий Інтернет речей».

На основі описаного загального бачення архітектури нових навчальних засобів було розроблене технічне завдання на науково-дослідну роботу для означення основних вимог до подальшої їх розробки (додаток А),

## **1.5 Висновки до розділу**

В результаті виконання досліджень в рамках даного розділу проведений огляд основних напрямків цифрової трансформації сучасного промислового виробництва, яка здійснюється з метою впровадження ідей четвертої промислової революції «Індустрія 4.0». Для подальшого обґрунтування загальної архітектури нових навчальних засобів дослідження студентами процесу цифрової трансформації була досліджена існуюча в комп'ютеризованій навчальній лабораторії реалізація допоміжного виробництва в рамках «віртуального виробництва» уявної хімічної продукції. Досліджена предметна область цифрової трансформації аналогічних технологічних процесів, та намічені ті її напрями, які можуть досліджуватися на нових навчальних засобах. Розроблена загальна архітектура нових комп'ютеризованих навчальних засобів, яка відображає і складові їх частини, і основні стадії виконання досліджень.

## **2 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИКОНАННЯ СТАДІЇ «МОДЕЛЮВАННЯ ІСНУЮЧОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО ТП»**

### **2.1 Модель потоку робіт**

Згідно з вимогами ТЗ на науково-дослідну роботу, що розроблене у попередньому розділі, перша стадія дослідження студентом процесу цифрової трансформації автоматизованого ТП (АТП) допоміжного виробництва промислового підприємства, що існує на даний час у вигляді лабораторної моделі «віртуального виробництва», має складатися з двох таких етапів:

– формування у студента вихідного уявлення про практичну реалізацію цього АТП на реальному виробничому підприємстві, тобто про реальний АТП, який відповідає існуючій лабораторній моделі;

– додаткове комп'ютерне моделювання статички та динаміки даного реального АТП.

В результаті виконання цих етапів у студента повинно сформуватися повне уявлення про будову та принцип дії реального АТП допоміжного виробництва промислового підприємства, який, по суті, являє собою відображення існуючого лабораторного АТП «віртуального виробництва» у його практичну реалізацію на реальному промисловому підприємстві. При цьому перший етап студент повинен виконувати шляхом самостійного дослідження предметної області реального АТП, що представлена у вигляді комплексу його вихідних комп'ютерних моделей, а викладач при цьому має надавати студенту усі необхідні пояснення та консультації в ході цього дослідження. Другий етап виконується і студентом, і викладачем, а саме, студентом – в ході вивчення відповідної професійної дисципліни або проходження відповідного проектного практикуму, а викладачем – при підготовці навчально-методичних матеріалів професійної дисципліни або проектного практикуму.

Проте, крім згаданих моделей, в основі загальної архітектури нових НЗ лежать ще дві інші моделі, з яких і починається весь процес дослідження студентом цифрової трансформації існуючого АТП допоміжного виробництва:

– лабораторна фізична модель ТП (лабораторний ТП) допоміжного виробництва;

– лабораторна програмно-технічна імітаційна модель інтегрованої автоматизованої системи управління (ІАСУ) як «віртуальним виробництвом» в цілому, так і даним лабораторним ТП (лабораторна ІАСУ) допоміжного виробництва.

Зрозуміло, що разом ці дві моделі і утворюють загальну модель існуючого лабораторного АТП допоміжного виробництва, яка означає його будову і принцип дії в рамках комп'ютерно-інтегрованого «віртуального виробництва», реалізованого на практиці у навчальній лабораторії ФПТА (фізична область лабораторії).

Таким чином, аналізуючи вищесказане, можна зробити такі висновки:

– в процесі виконання першої стадії дослідження цифрової трансформації існуючого АТП допоміжного виробництва активною повинна бути не тільки роль актора «Студент», але і роль актора «Викладач», що веде професійну дисципліну або проектний практикум;

– обидва активні актори «Студент» та «Викладач» у ході виконання даної стадії повинні поступово розробляти дві пов'язані між собою комп'ютерні моделі – існуючого лабораторного АТП та відповідного йому реального АТП.

Опишемо тепер загальне бачення процесу виконання на нових НЗ стадії «Моделювання існуючого АТП» у вигляді моделі потоку робіт, яка є інструментом методології структурного аналізу IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling), розробленої в США на початку 90-х років минулого сторіччя для функціонального моделювання ділових процесів [25]. Модель потоку робіт показує послідовність виконання робіт даної стадії дослідження акторами «Студент» та «Викладач», а також вхідні та вихідні дані або об'єкти кожної з цих робіт (рисунок 2.1 та додаток Б).

Показані на рисунку роботи (прямокутники) виконуються акторами «Викладач» і «Студент» у двох областях НЗ – у фізичній області лабораторної ІАСУ «віртуальним виробництвом» (навчальна лабораторія «Промислова

мікропроцесорна техніка» ФПТА) та у віртуальній області комп'ютерного моделювання (програмне забезпечення або лабораторних комп'ютерів, або домашніх комп'ютерів студентів, або хмарних сервісів моделювання). Результати цих діяльностей показані вихідними стрілками з правого боку кожного з прямокутників, що означають роботи. У цій моделі актор «Викладач» за своєю ініціативою починає виконання всієї послідовності робіт даної стадії дослідження цифрової трансформації існуючого АТП допоміжного виробництва, а далі роботи виконуються вже двома акторами разом.

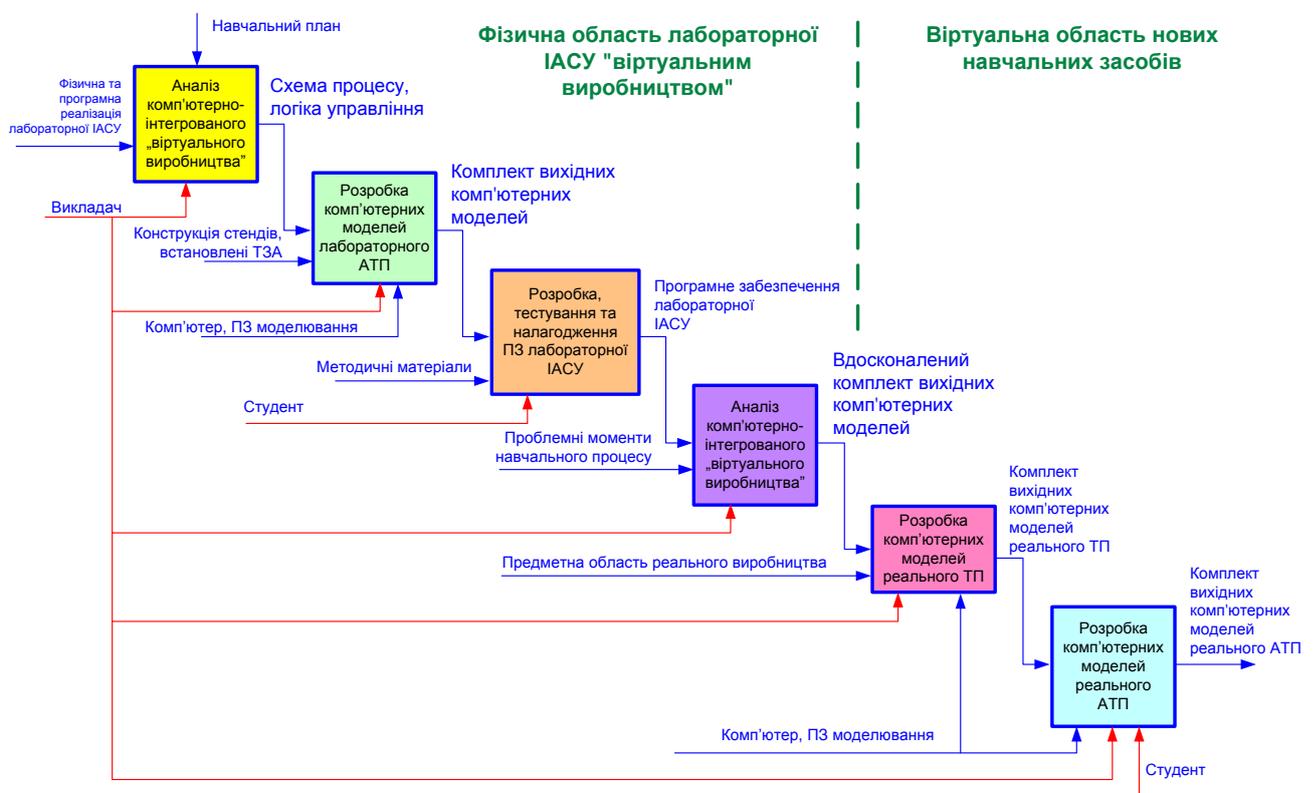


Рисунок 2.1 – Модель потоку робіт на стадії «Моделювання існуючого АТП»

Як зазначено, спочатку актор «Викладач» починає аналізувати комп'ютерно-інтегроване «віртуальне виробництво», яке існує в лабораторії у вигляді програмно-технічної імітаційної моделі ІАСУ всім цим виробництвом в цілому та окремими електромеханічними імітаційними моделями ТП допоміжного виробництва, що разом утворюють лабораторний АТП. Така модель

комп'ютерно-інтегрованого виробництва складається з фізичної та програмної частин. Фізична частина містить електромеханічні моделі ТП та реальні промислові засоби його автоматизації. Програмна частина містить як програмні моделі деяких процесів (наприклад транспортування) та окремих пристроїв автоматизації (наприклад датчиків положення «руки» промислового робота автоматизованої виробничої лінії), так і прикладні програми управління даним ТП та виробничим процесом в цілому.

На основі проведеного аналізу актор «Викладач» за допомогою доступних комп'ютерних додатків розробляє вихідний комплект моделей, що описують устрій лабораторного АТП та принцип його дії на «віртуальному виробництві». Після цього цей комплект моделей, оформлених у вигляді електронних навчально-методичних матеріалів, використовує актор «Студент», який на практичному курсі відповідної професійної дисципліни, чи кількох дисциплін, вивчає ІАСУ «віртуальним виробництвом», розробляючи та тестуючи її програмне забезпечення (ПЗ). Для бакалаврського рівня підготовки такими дисциплінами можуть бути «Технічні засоби автоматизації», «Інтегровані системи управління» та «Проектування систем автоматизації».

Далі актор «Викладач» може додатково зробити аналіз результатів практичної роботи, виконаної актором «Студент», і внести потрібні корективи у вихідний комплект моделей існуючого АТП. Наприклад, за цим сценарієм до електромеханічних імітаційних моделей ТП допоміжного «віртуального виробництва» були введені додаткові світлові імітаційні моделі промислового конвеєрного транспорту для відображення подачі вихідних матеріалів з виробничого складу на допоміжне виробництво, або виготовленої пустої тари (банок різних типів) на виробничий склад чи до ТП дозування. Ці додаткові моделі також були відповідним чином описані у навчально-методичному матеріалі.

Загалом, усі описані вище роботи стосуються тільки практичного вивчення студентом існуючої лабораторної ІАСУ, що побудована за концепцією «Індустрія 3.0», тобто поточний стан комп'ютерно-інтегрованого виробництва (на рисунку 2.1 ці роботи відокремлені вертикальною пунктирною лінією зеленого кольору).

Проте нові НЗ призначені для дослідження процесу цифрової трансформації, тобто переходу від ІАСУ за концепцією «Індустрія 3.0» до ІАСУ за концепцією «Індустрія 4.0». Чому ж на ньому треба вивчати поточний стан ІАСУ? А тому, що ця ІАСУ реалізує той же самий стандартний підхід до управління періодичним «віртуальним виробництвом» [26, 27], що і ІАСУ за концепцією «Індустрія 4.0» [28]. Іншими словами, вивчаючи поточний стан ІАСУ, актор «Студент» освоює і принцип дії ІАСУ «розумного» періодичного виробництва, у яку він буде далі трансформувати існуючий АТП за допомогою нових НЗ. Крім того, актор «Студент» в ході розробки та тестування прикладного ПЗ з'ясовує для себе його переваги та недоліки, наприклад, обмежений функціонал, що далі буде корисним при обґрунтуванні шляхів цифрової трансформації існуючого АТП.

Для того, щоб актор «Студент» зміг почати виконувати діяльності, пов'язані з цифровою трансформацією існуючого АТП, в першу чергу йому треба надати вихідні моделі реального ТП, постачені текстовими поясненнями.

Розробку таких вихідних моделей виконує актор «Викладач», який на основі свого бачення, знань та досвіду може здійснити фахову уявну трансформацію лабораторного ТП у реальний ТП промислового підприємства (рисунок 2.2).

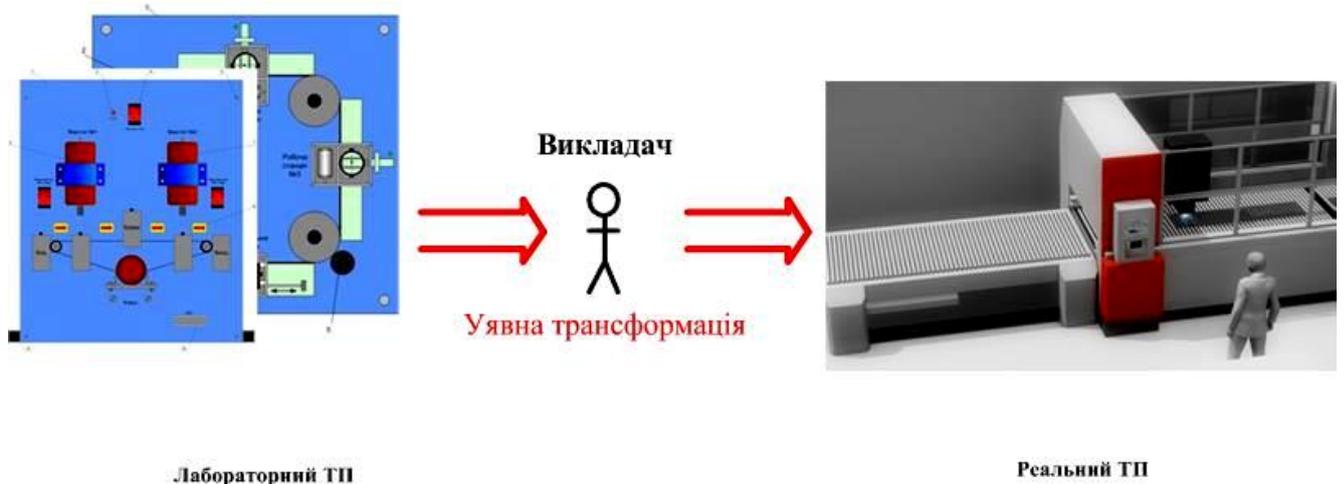


Рисунок 2.2 – Суть уявної трансформації лабораторного ТП

Такі моделі актор «Викладач» розроблює за допомогою доступних комп'ютерних графічних та текстових редакторів (локальних чи хмарних), використовуючи і їх додаткові функції, наприклад, вбудовані мови програмування для технічної анімації моделі реального ТП. Якщо ці функції відсутні, то «Викладач» може застосувати доступні промислові програмні засоби автоматизації, в яких функція технічної анімації графічних об'єктів є штатною.

В результаті даної роботи актора «Викладач» формується вихідний комплект комп'ютерних моделей реального ТП, який надалі дає можливість актору «Студент» почати виконувати роботу по уявній трансформації реального ТП у реальний АТП, тобто ТП, оснащений усіма технічними засобами автоматизації, що утворюють ІАСУ реальним ТП (рисунок 2.3).

В результаті такої роботи актора «Студент» створюються комп'ютерні моделі реального АТП, які всебічно описують його будову та принцип дії з потрібним ступенем деталізації.

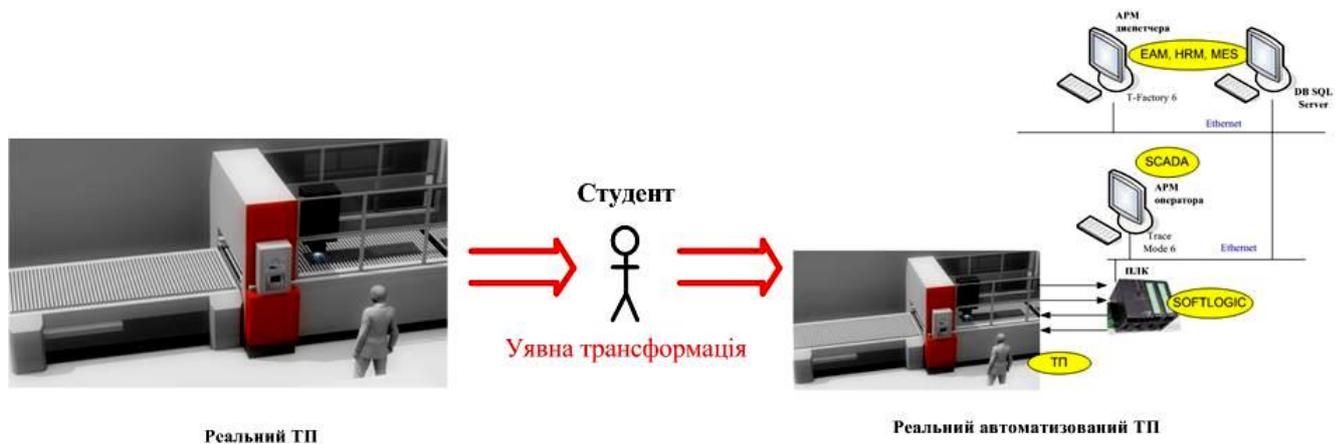


Рисунок 2.3 – Суть уявної трансформації реального ТП в реальний АТП

В якості додаткових моделей статичної та динамічної реального АТП актор «Студент» може використовувати ті комп'ютерні моделі, які він використовував в ході розробки та тестування ПЗ існуючого лабораторного АТП, наприклад, схему програми промислового контролера (алгоритм її дії однаковий і для лабораторного, і для реального АТП), або схему даних АРМ оператора (обробка

даних в ПЗ АРМ оператора лабораторного АТП така сама, як і в АРМ оператора реального АТП). Крім того, актор «Студент» для технічної анімації своєї моделі реального АТП може використовувати штатні функції тих промислових програмних систем автоматизації, з якими він мав справу при розробці лабораторного АТП. Актор «Викладач» на цьому етапі моделювання реального АТП також може створювати його додаткові моделі, які допомагають актору «Студент» краще зрозуміти особливості будови та принципу дії цього АТП. Наприклад, викладач може розробити додаткову 3D-модель реального промислового робота, щоб студент зміг краще зрозуміти його конструкцію та ґрунтовніше вибрати засоби автоматизації, що мають монтуватися на ньому.

В результаті цих діяльностей у актора «Студент» формується повне уявлення про будову та принцип дії існуючого реального АТП і він може перейти до наступної стадії дослідження.

## **2.2 Розробка моделей існуючого АТП актором «Викладач»**

Моделювання будь-якого реального об'єкту стає зараз дуже ефективним інструментом як донесення навчального матеріалу від викладача до студента, так і самостійного вивчення студентом цього об'єкту [29]. Ось чому в нових НЗ також широко застосовується цей інструмент, особливо на стадії «Моделювання існуючого АТП».

Як було зазначено вище, актор «Викладач» при виконанні даної стадії дослідження актором «Студент» цифрової трансформації АТП допоміжного виробництва промислового підприємства повинен розробляти різні комп'ютерні моделі, які можна згрупувати у такі групи – «Моделі існуючого лабораторного АТП» та «Моделі існуючого реального АТП». У першу групу входять моделі, які надають достатніх вихідних знань для актора «Студент» щоб він зміг здійснювати діяльність «Розробка, тестування та налагодження ПЗ лабораторної ІАСУ» в рамках практичного курсу однієї чи кількох професійних дисциплін. Усі такі моделі включаються у відповідні навчально-методичні матеріали, які доступні для

актора «Студент» через навігатори навчальних дисциплін системи JetIQ [30, 31]. По-перше, ці моделі повинні пояснювати ідею лабораторного «віртуального виробництва», по-друге, будову та принцип дії лабораторної ІАСУ цим виробництвом, по-третє, конструкцію електромеханічних імітаційних моделей та принцип дії лабораторного АТП.

Для прикладу нижче наведені кілька таких комп'ютерних моделей, розроблених актором «Викладач». На рисунку 2.4 показана модель основного ТП лабораторного «віртуального виробництва», яка розроблена в додатку «Power Point» у вигляді комп'ютерної презентації. В цій моделі використовуються як статичні об'єкти, що відображають промислове обладнання цього «віртуального технологічного процесу», так і динамічні об'єкти, які демонструють роботу цього обладнання (наприклад промислових конвеєрів). До цієї графічної моделі додається детальний текстовий опис, що разом дає можливість актору «Студент» краще зрозуміти принцип його дії та взаємні виробничі зв'язки уявного промислового обладнання. В подальшому ці знання актор «Студент» може використати при розробці ПЗ лабораторної ІАСУ даним виробництвом.



Рисунок 2.4 – Комп'ютерна модель основного ТП «віртуального виробництва»

На рисунку 2.5 показана інша графічна модель, що розробляє актор «Викладач». Вона показує принцип організації лабораторної ІАСУ «віртуальним виробництвом» у приміщенні навчальної аудиторії.

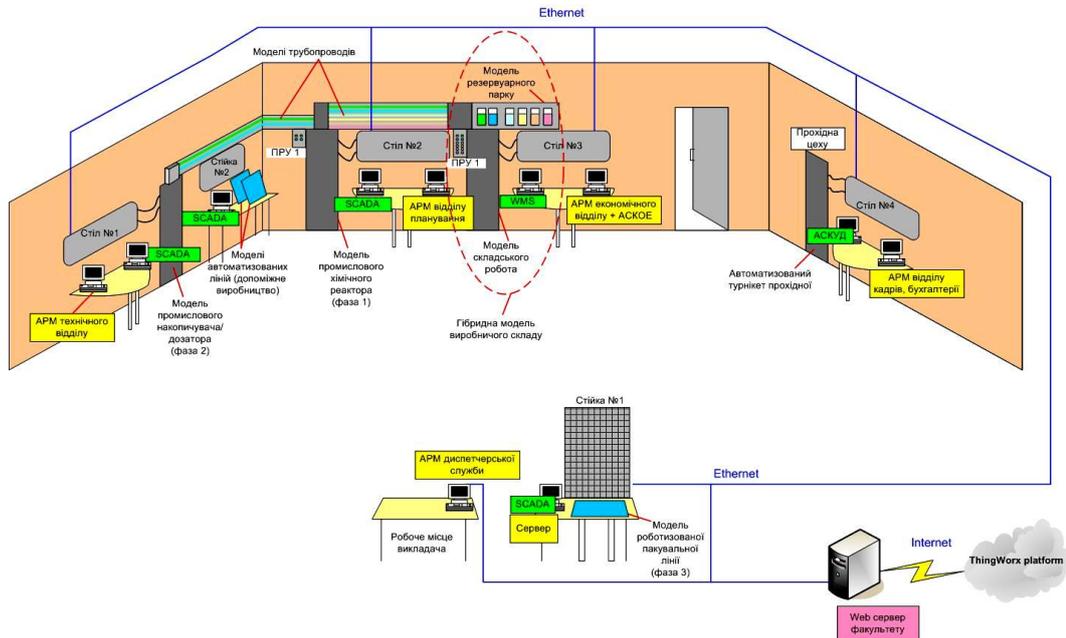


Рисунок 2.5 – Комп’ютерна модель організації ІАСУ у приміщенні лабораторії

На рисунку 2.6 показана стандартна графічна модель функціональної структури системи управління періодичним виробництвом, яка лежить в основі роботи лабораторної ІАСУ.

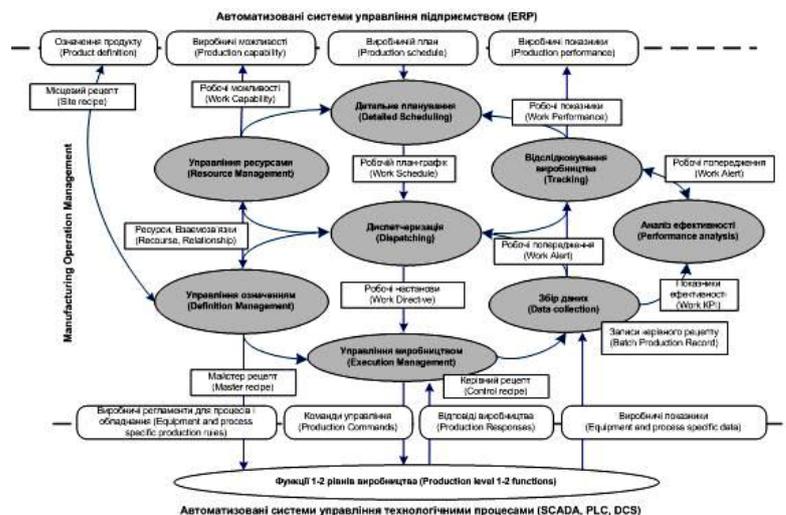


Рисунок 2.6 – Графічна модель функціональної структури лабораторної ІАСУ

Комп'ютерна графічна модель лабораторного ТП, яка розробляється актором «Викладач», вже була наведена вище (див. рисунок 2.2, ліве зображення). На її основі розробляються графічні моделі системи автоматизації цього ТП, наприклад, у вигляді функціональної схеми автоматизації (рисунок 2.7, зліва) чи структурної електричної схеми (рисунок 2.7, справа).

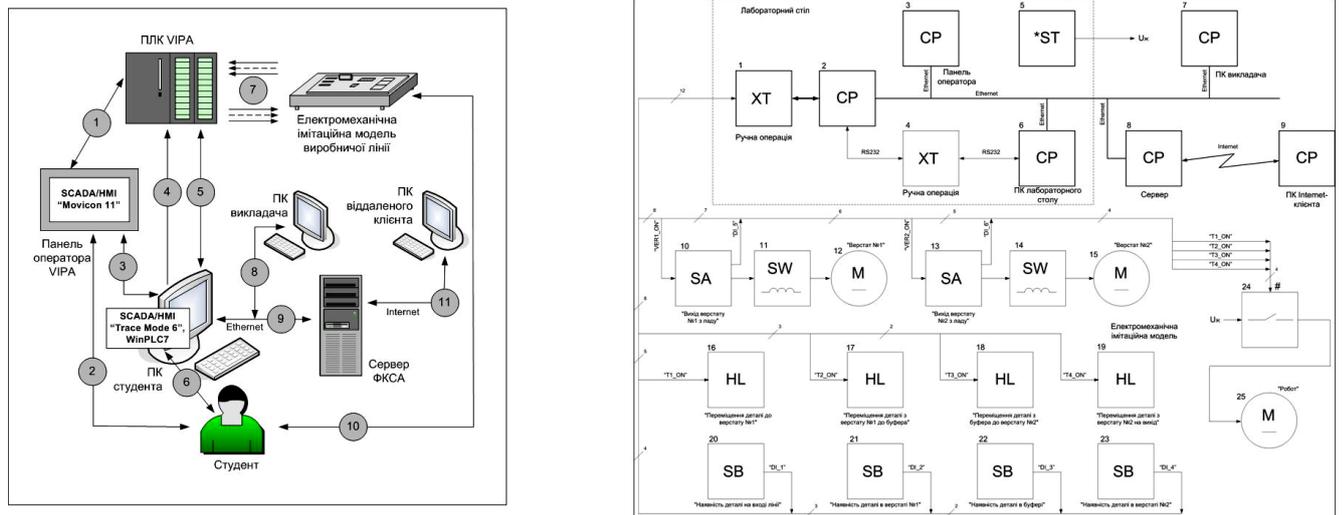


Рисунок 2.7 – Комп'ютерні графічні моделі лабораторного АТП

Тепер розглянемо моделювання, що здійснює актор «Викладач» при розумовій трансформації існуючого лабораторного ТП у реальний ТП (див. рисунок 2.2). Ця модель реального ТП повинна бути достатньо інформативною, щоб актор «Студент» на її основі далі зміг здійснити розумову трансформацію реального ТП у реальний АТП (див. рисунок 2.3). Тому кращим варіантом є використання 3D-моделювання реального ТП з можливістю застосування в цій моделі засобів технічної анімації.

На рисунку 2.8 показаний варіант такої 3D-моделі реального ТП допоміжного виробництва промислового підприємства, що розроблена засобами графічного редактора «Visio», доступного на хмарному сервісі [32]. Даний графічний редактор не призначений для повноцінного 3D-моделювання, проте, інструменти побудови ізометричних 3D-зображень розвинені в ньому достатньо сильно, крім того, існують спеціалізовані сайти, де викладені комплекти ізометричних графічних об'єктів, зокрема, для області промисловості.

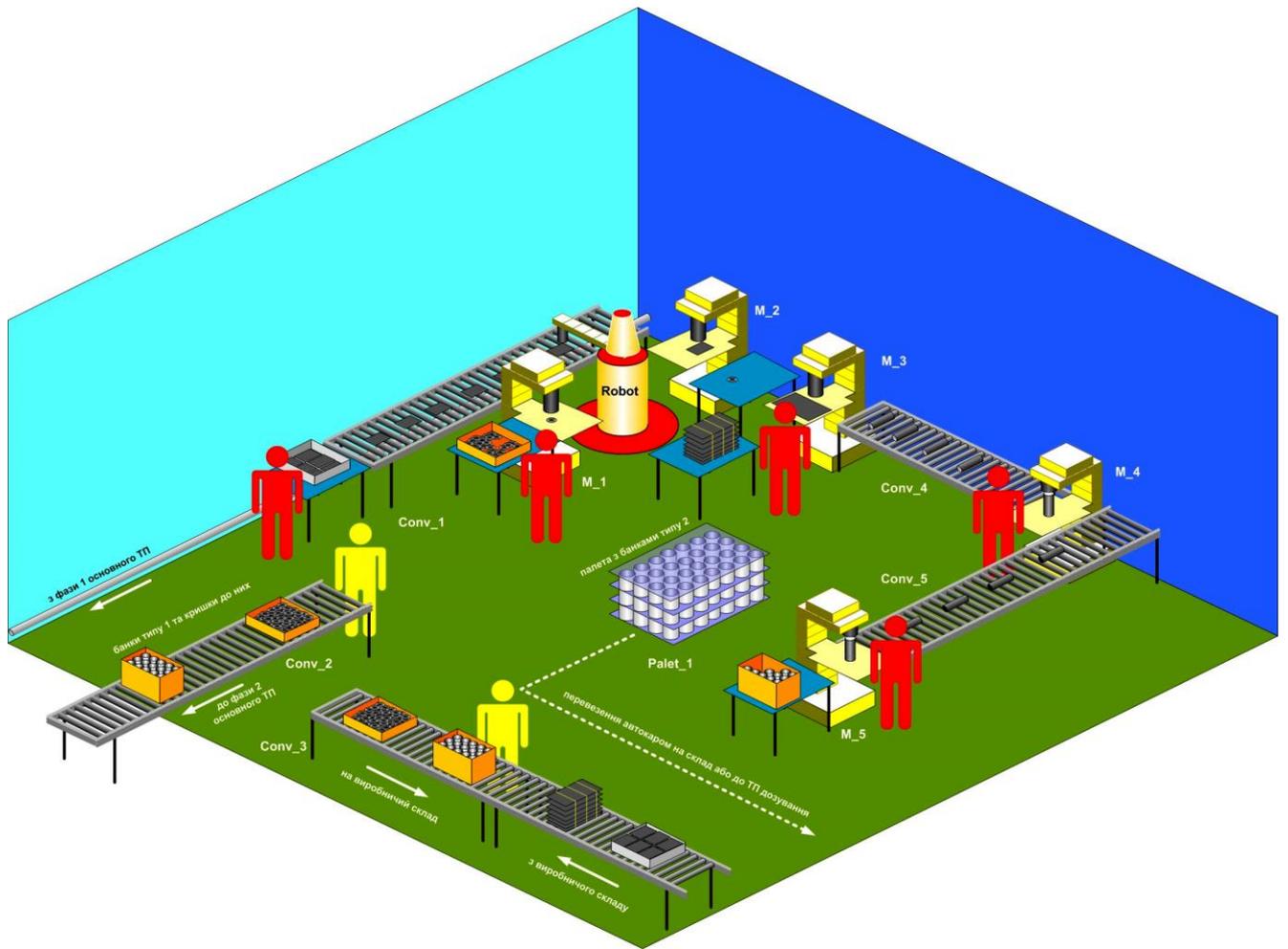


Рисунок 2.8 – Ізометрична графічна модель реального ТП допоміжного виробництва

На цій моделі відображено реальне приміщення деякого промислового підприємства, де змонтовані дві автоматизовані виробничі лінії та усе інше обладнання, що забезпечують їх роботу.

Дана модель детально описується актором «Викладач» у відповідному текстовому документі, де означається не тільки конструктивна будова цього реального ТП та його принцип дії, але і надається повний перелік встановленого промислового обладнання, його основні конструктивні/технічні/експлуатаційні характеристики, а також перелічуються ті основні матеріальні ресурси, з якими працює це обладнання.

У таблиці 2.1 показаний зразок такого переліку.

Таблиця 2.1 – Промислове обладнання та ресурси реального ТП

Позначення	Призначення	Характеристики
M_1	Друга робоча станція (верстат) автоматизованої лінії з виготовлення кришок	Тип, встановлені засоби автоматизації та електроприводи
M_2	Перша робоча станція (верстат) автоматизованої лінії з виготовлення кришок	- « -
M_3	Перша робоча станція (верстат) автоматизованої лінії з виготовлення банок	- « -
M_4	Друга робоча станція (верстат) автоматизованої лінії з виготовлення банок	- « -
M_5	Третя робоча станція (верстат) автоматизованої лінії з виготовлення банок	- « -
Robot	Транспортний робот автоматизованої лінії з виготовлення кришок	- « -
Conv_1	Промисловий конвеєр переміщення заготовок для кришок до першої робочої станції «M_2»	Розмір, швидкість, вмонтовані засоби автоматизації, тип електричного приводу
Conv_2	Промисловий конвеєр для переміщення коробок з комплектами пустої тари типу 1 (банки меншого розміру та кришки до них) з допоміжного виробництва до дозатора	- « -
Conv_3	Промисловий конвеєр для переміщення коробок з комплектами пустої тари типу 1 (банки меншого розміру та кришки до них) з допоміжного виробництва до виробничого складу та для переміщення заготовок зі складу до допоміжного виробництва	- « -
Conv_4	Промисловий конвеєр переміщення напівфабрикату банки від робочої станції (верстату) «M_3» до робочої станції (верстату) «M_4»	- « -

Продовження таблиці 2.1

Conv_5	Промисловий конвеєр переміщення напівфабрикату банки від робочої станції (верстату) «М_4» до робочої станції (верстату) «М_5»	- « -
Palet_1	Палета з виробленою тарою типу 2 (банки більшого розміру), що переміщується автокаром або до дозатора основного ТП, або до виробничого складу	Габарити, розмір пустої тари та кількість одиниць

Таку статичну графічну модель реального ТП актор «Викладач» може «оживити» за допомогою доступного програмного додатку. Наприклад, останні версії графічного редактора «Visio» за рахунок вбудованих макросів дозволяють додавати до графічних моделей елементи технічної анімації. Можна використати і доступні програмні системи промислової автоматизації, наприклад IDE «SCADA Trace Mode 6», яку актор «Студент» використовує для автоматизації лабораторного ТП. На рисунку 2.9 показаний варіант «оживлення» ізометричної моделі реального ТП засобами цієї програмної системи.

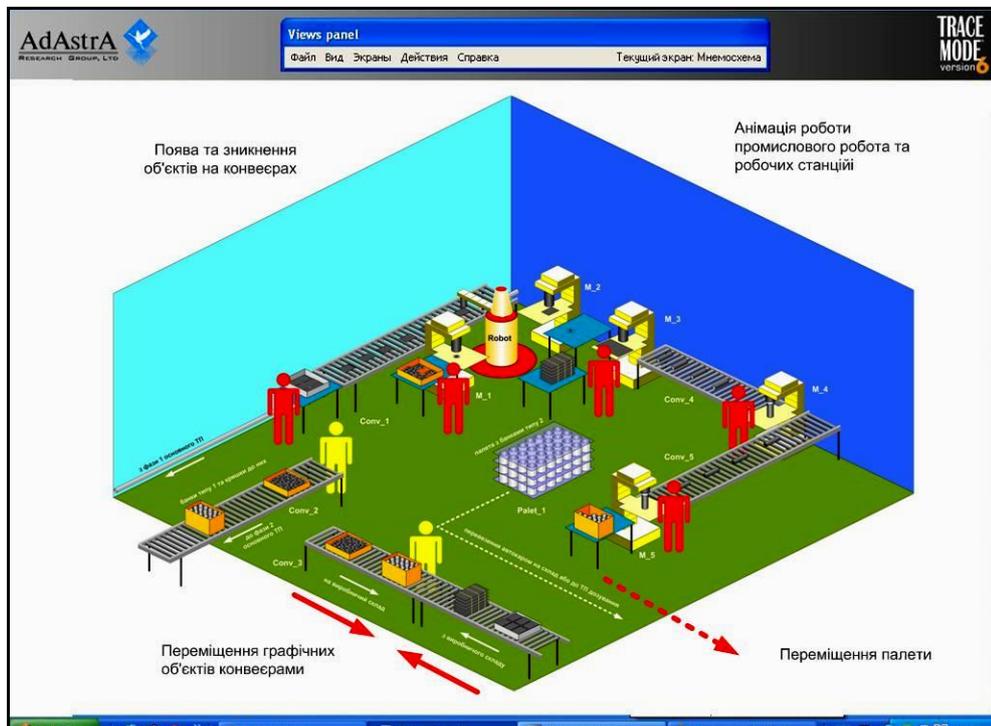


Рисунок 2.9 – Додавання засобів технічної анімації в ізометричну модель

З рисунку видно, що всі графічні об'єкти на п'яти конвеєрах реального ТП можуть рухатися у потрібному напрямі, а також зникати та з'являтися на конвеєрах у потрібний момент часу у відповідності до логіки виконання виробничого процесу. Можна також відобразити і переміщення палети з виготовленою пустою тарою типу 2 (великі банки) з приміщення допоміжного виробництва до виробничого складу, навіть показати автокар, що рухається.

Логіку роботи такої тривимірної моделі динаміки реального ТП можна програмувати штатними засобами IDE «SCADA Trace Mode 6», наприклад, на мовах FBD, IL, ST або C.

Таким чином, у результаті описаних робіт актора «Викладач» буде розроблений повний комплект комп'ютерних моделей реального ТП, які надаються актору «Студент», щоб він зміг далі почати трансформацію цього реального ТП у реальний автоматизований ТП, використовуючи при цьому і інші вихідні та додаткові комп'ютерні моделі.

### **2.3 Розробка моделей існуючого АТП актором «Студент»**

Як зазначено вище, актор «Студент» приймає активну участь у виконанні кожного етапу даної стадії дослідження цифрової трансформації ТП допоміжного виробництва. Так, на першому етапі:

– актор «Студент» спочатку в ході практичного практикуму з однієї чи кількох професійних дисциплін розробляє прикладне ПЗ для лабораторного АТП (лабораторний ТП та лабораторна ІАСУ разом), користуючись при цьому комплектом його вихідних моделей, наданих «Викладачем», та розробляючи свої проєктні моделі даного ПЗ, що поступово призводить до формування його власного уявлення про лабораторний АТП;

– потім актор «Студент», отримавши від актора «Викладач» комплект вихідних комп'ютерних моделей реального ТП в рамках іншої професійної дисципліни (наприклад «Кіберфізичні системи автоматизації виробництва»), поступово формує у себе вихідне уявлення про реальний АТП (реальний ТП та

реальна ІАСУ разом), що функціонує на основі тих же принципів, як і лабораторний АТП.

На другому етапі актор «Студент» в рамках тієї ж професійної дисципліни, використовуючи окремі проектні моделі прикладного ПЗ лабораторного АТП, розробляє комп'ютерну модель реального АТП, яка являє собою поєднання моделі реального ТП, наданої актором «Викладач», та моделі реальної ІАСУ (має будуватися за тими ж принципами, що і лабораторна ІАСУ, але складатися з інших програмно-технічних засобів автоматизації, які краще відповідають експлуатаційно-технічним характеристикам реального ТП).

Розглянемо спочатку кілька прикладів комп'ютерних моделей, які актор «Студент» розробляє на першому етапі даної стадії дослідження цифрової трансформації існуючого АТП допоміжного виробництва. На рисунку 2.10 показана графічна модель існуючого лабораторного АТП у вигляді схеми підключення, яка показує електричні зв'язки між усіма пристроями, що утворюють ІАСУ допоміжним виробництвом.

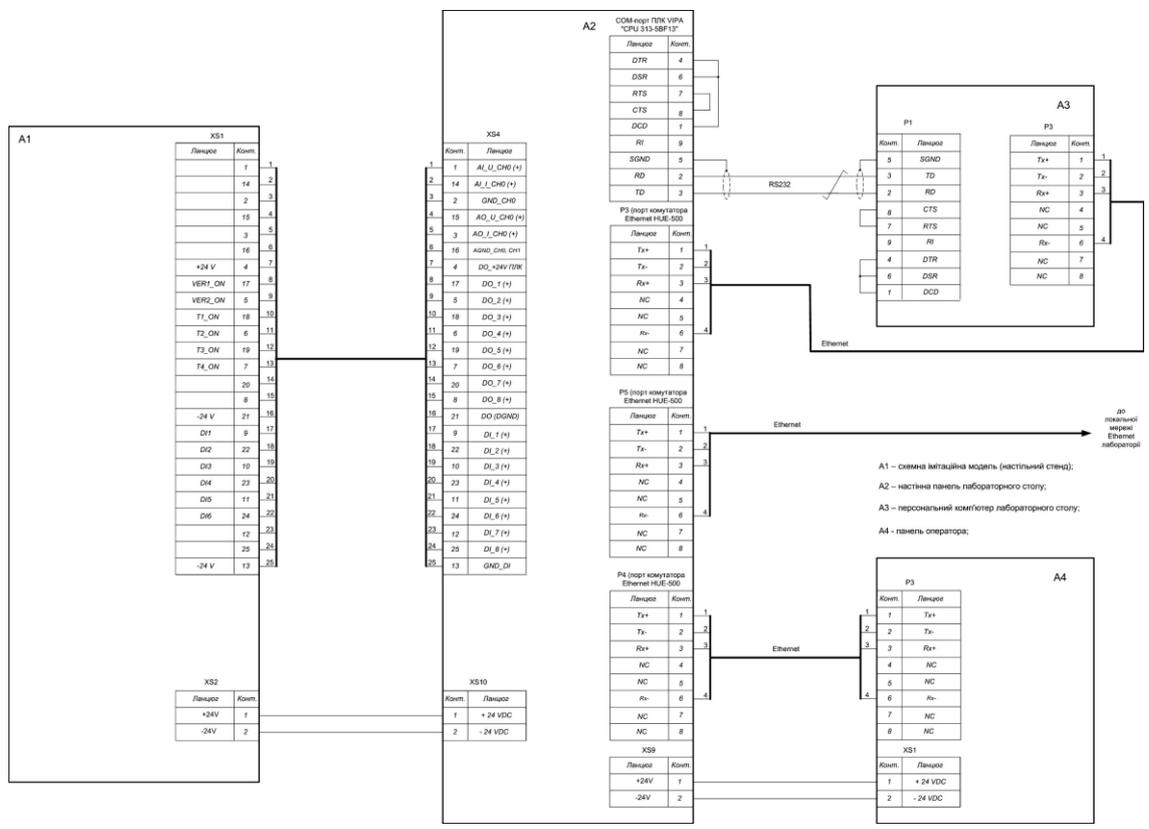


Рисунок 2.10 – Графічна модель лабораторного АТП у вигляді схеми підключення

На основі моделей апаратної частини лабораторної ІАСУ допоміжним виробництвом актор «Студент» далі розробляє відповідні моделі прикладного ПЗ цієї системи. На рисунку 2.11 показана одна з таких моделей прикладного ПЗ промислового контролера, який здійснює управління процесом лабораторного ТП допоміжного виробництва (автоматизована виробнича лінія з транспортним роботом для виготовлення кришок до банок). Ця модель відноситься до стадії ескізного проектування ПЗ.

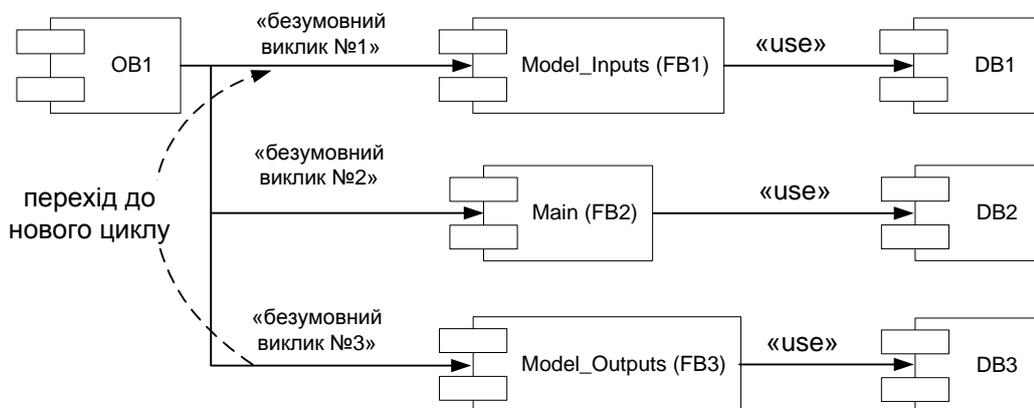


Рисунок 2.11 – Блочна структура прикладної програми ПЛК лабораторного АТП

Ця модель показує, як доцільно побудувати цю програму, щоб можна здійснювати управління лабораторним ТП автоматизованої лінії допоміжного виробництва відповідно до отриманого Керівного рецепту, сформованого в лабораторній ІАСУ. Цю та інші ескізні моделі ПЗ промислового контролера актор «Студент» розробляє в рамках практичного курсу відповідної професійної дисципліни, наприклад «Технічні засоби автоматизації».

На рисунку 2.12 показана графічна модель архітектури ПЗ лабораторної ІАСУ ТП допоміжного виробництва (автоматизована лінія з виготовлення кришок), яка реалізує стандартні принципи управління періодичним технологічним процесом [33]. Ця модель розробляється актором «Студент» у практичному курсі іншої професійної дисципліни, наприклад «Інтегровані



В рамках практичного курсу професійної дисципліни «Проектування систем автоматизації» актор «Студент» може також розробляти додаткові графічні моделі прикладного ПЗ лабораторного АТП допоміжного виробництва. Наприклад, на рисунку 2.14 показана графічна модель шаблону головного екрану НМІ оператора лабораторного АТП (автоматизована лінія з виготовлення кришок), яка на стадії технічного проєкту реалізується за допомогою інструментальної системи промислової автоматизації IDE «SCADA Trace Mode б».

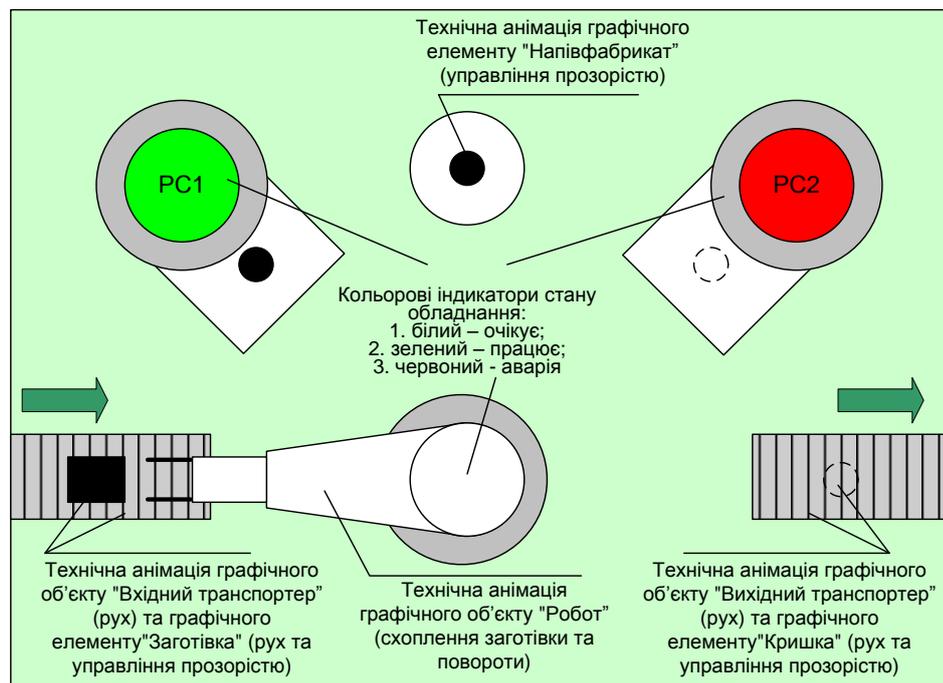


Рисунок 2.14 – Графічна модель шаблону головного екрану НМІ оператора

Усі показані вище моделі актор «Студент» в ході практичних занять реалізує у вигляді прикладного ПЗ, тестує його та налаштовує потрібним чином, отримуючи при цьому цінні знання щодо будови та принципу дії лабораторного АТП в цілому.

Розглянемо тепер ті комп'ютерні моделі, які актор «Студент» обов'язково має розробляти на другому етапі стадії «Моделювання існуючого АТП». Як було зазначено вище, «Студент» використовує при цьому як тривимірну модель реального ТП, надану актором «Викладач» (див. рисунок 2.8), та, якщо є,

додаткову модель динаміки цього ТП (див. рисунок 2.9), так і деякі графічні моделі прикладного ПЗ лабораторної ІАСУ, розроблені «Студентом» в рамках різних професійних дисциплін (див. рисунки 2.10 – 2.14).

На даному етапі актор «Студент» повинен розробити модель реальної ІАСУ, яка відображає, по суті, варіант реалізації лабораторної ІАСУ в умовах реального промислового підприємства. Ці умови, без сумніву, відрізняються від тих умов, які є в лабораторії. На підприємстві має бути встановлене реальне промислове обладнання, що має конкретні конструктивні/технічні/експлуатаційні характеристики, а обробляються та переміщуються реальні матеріальні ресурси з відповідними фізико-хімічними властивостями. Тому спочатку актор «Студент» повинен обґрунтовано вибрати для цієї ІАСУ відповідні промислові технічні засоби автоматизації (ТЗА) і розмістити їх на ізометричній моделі реального ТП (рисунок 2.15).

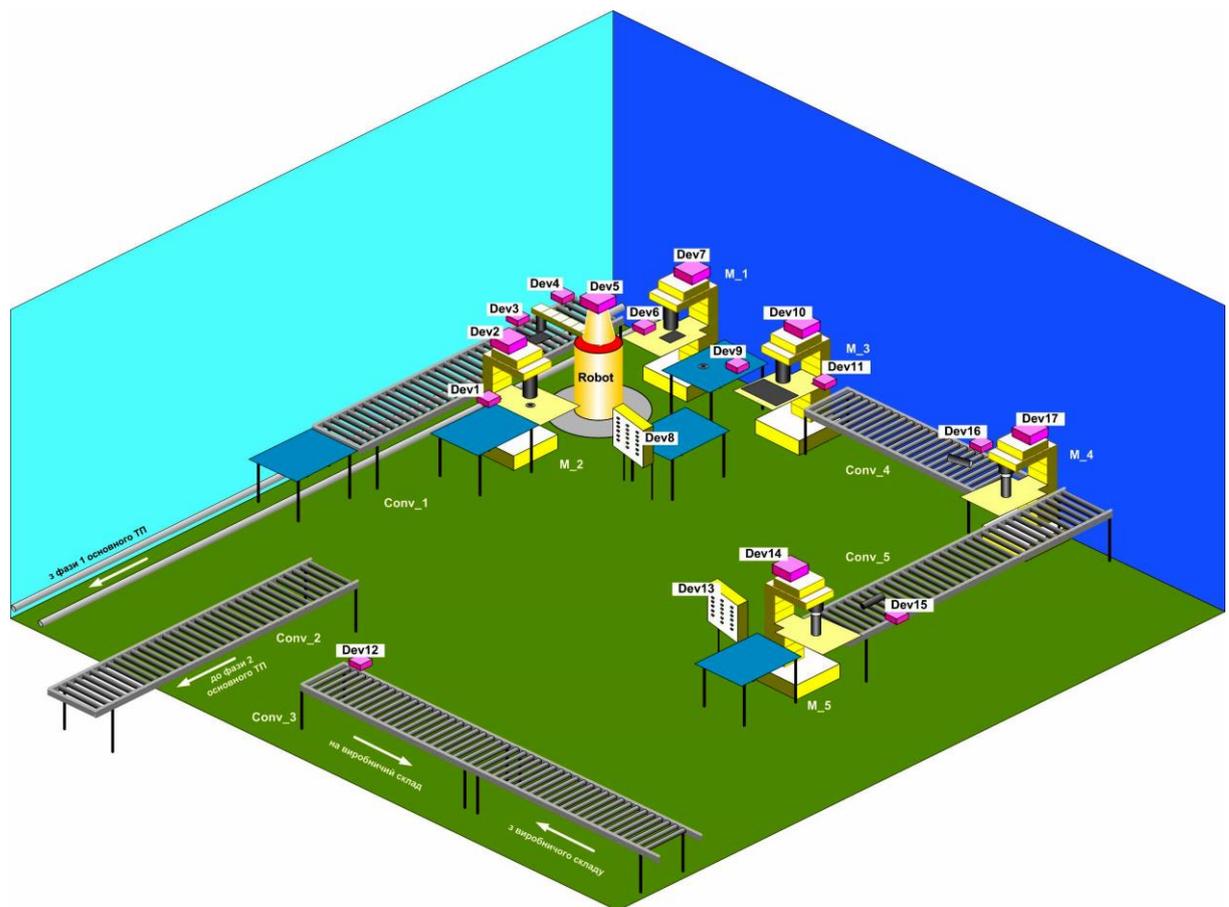


Рисунок 2.15 – Розміщення вибраних ТЗА на тривимірній моделі реального ТП

На рисунку кожному технічному засобу автоматизації (ТЗА) привласнене позиційне позначення «Dev#», де # - позиційний номер. Ці ТЗА обґрунтовано вибираються актором «Студент» з відповідних каталогів промислової автоматизації, враховуючи конструктивні/технологічні/експлуатаційні характеристики промислового обладнання реального ТП, що наведені вище у таблиці 2.1.

Графічна модель постачається текстовим переліком усіх вибраних ТЗА з означенням їх призначення, типу та основних конструктивно-технічних характеристик (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 – Технічні засоби автоматизації реального ТП

Поз. позначення	Призначення	Тип	Характеристики
Dev1	Датчик завантаженого стану робочої станції «M_2»	...	...
Dev2	Вбудований контролер робочої станції «M_2»	...	...
Dev3	Датчик робочої позиції заготівки кришки на конвеєрі «Conv_1»	...	...
Dev4	Датчик крайньої припустимої позиції заготівки кришки на конвеєрі «Conv_1»	...	...
Dev5	Вбудований контролер промислового робота «Robot»	...	...
Dev6	Датчик завантаженого стану робочої станції «M_1»	...	...
Dev7	Вбудований контролер робочої станції «M_1»	...	...
Dev8	Промисловий контролер автоматизованої виробничої лінії з виготовлення кришок	...	...
Dev9	Датчик заповнення буфера	...	...

Продовження таблиці 2.2

Dev10	Вбудований контролер робочої станції «М_3»	...	...
Dev11	Датчик завантаженого стану робочої станції «М_3»	...	...
Dev12	Датчик крайньої припустимої позиції матеріального ресурсу на конвеєрі «Conv_2»	...	...
Dev13	Промисловий контролер автоматизованої виробничої лінії з виготовлення банок	...	...
Dev14	Вбудований контролер робочої станції «М_5»	...	...
Dev15	Датчик робочої позиції заготівки банки на конвеєрі «Conv_5»	...	...
Dev16	Датчик робочої позиції заготівки банки на конвеєрі «Conv_4»	...	...
Dev17	Вбудований контролер робочої станції «М_4»	...	...

Після розміщення усіх ТЗА на тривимірній моделі реального ТП актор «Студент» повинен спроектувати систему сигнальної арматури, яка забезпечить передачу електричних сигналів (вимірювання, управління) між промисловими контролерами «Dev8» і «Dev13» й рештою ТЗА реального АТП допоміжного виробництва. Для «прокладання» сигнальних кабелів на реальному підприємстві зазвичай застосовується спеціальна монтажна арматура. На рисунку 2.16 показаний варіант розміщення цієї арматури у приміщенні реального ТП. Ця арматура являє собою монтажні профілі, що встановлені на вертикальних опорах. Всередині цих профілів при монтажі укладаються сигнальні кабелі, що йдуть від/до промислового контролера. Біля місця розміщення відповідного ТЗА потрібний сигнальний кабель опускається з монтажного профілю і підключається до цього ТЗА. В результаті прокладки усіх сигнальних кабелів актор «Студент» отримає тривимірну модель електричного монтажу ТЗА на реальному ТП (рисунок 2.17).

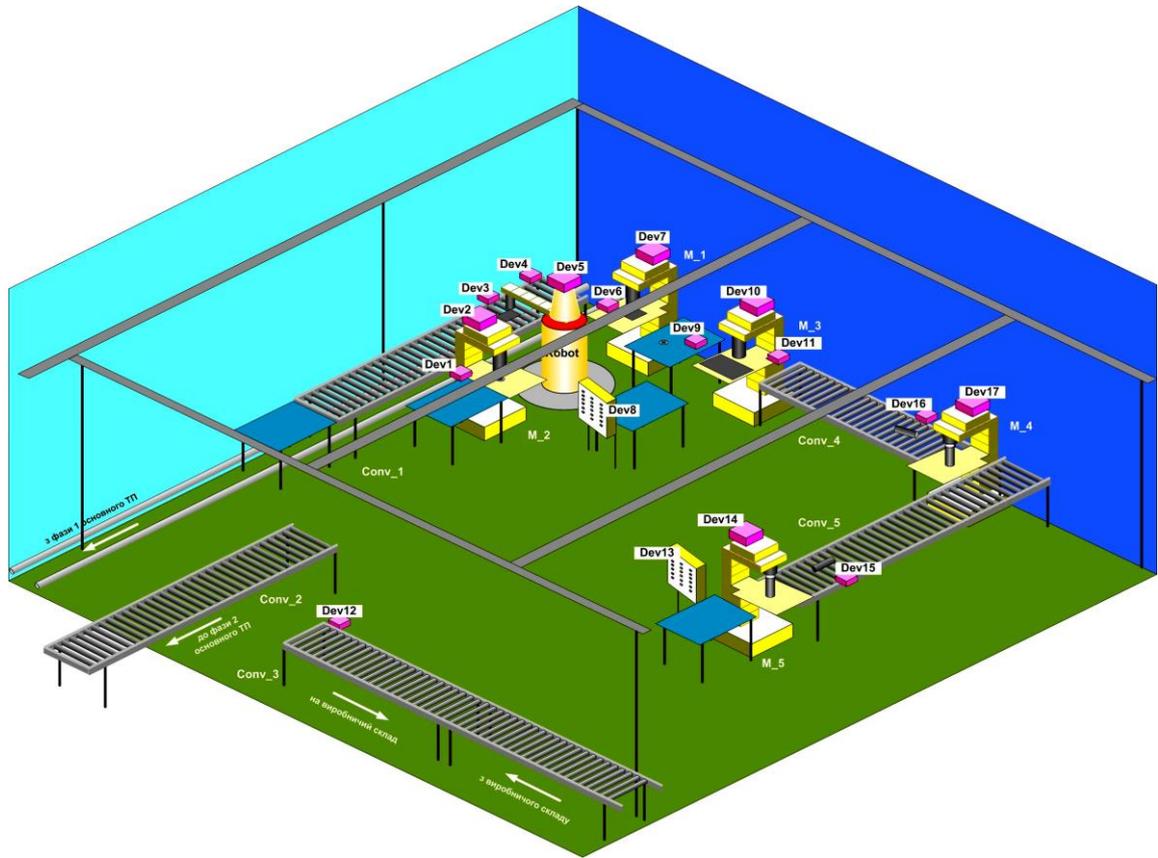


Рисунок 2.16 – Розміщення монтажної арматури на реальному ТП

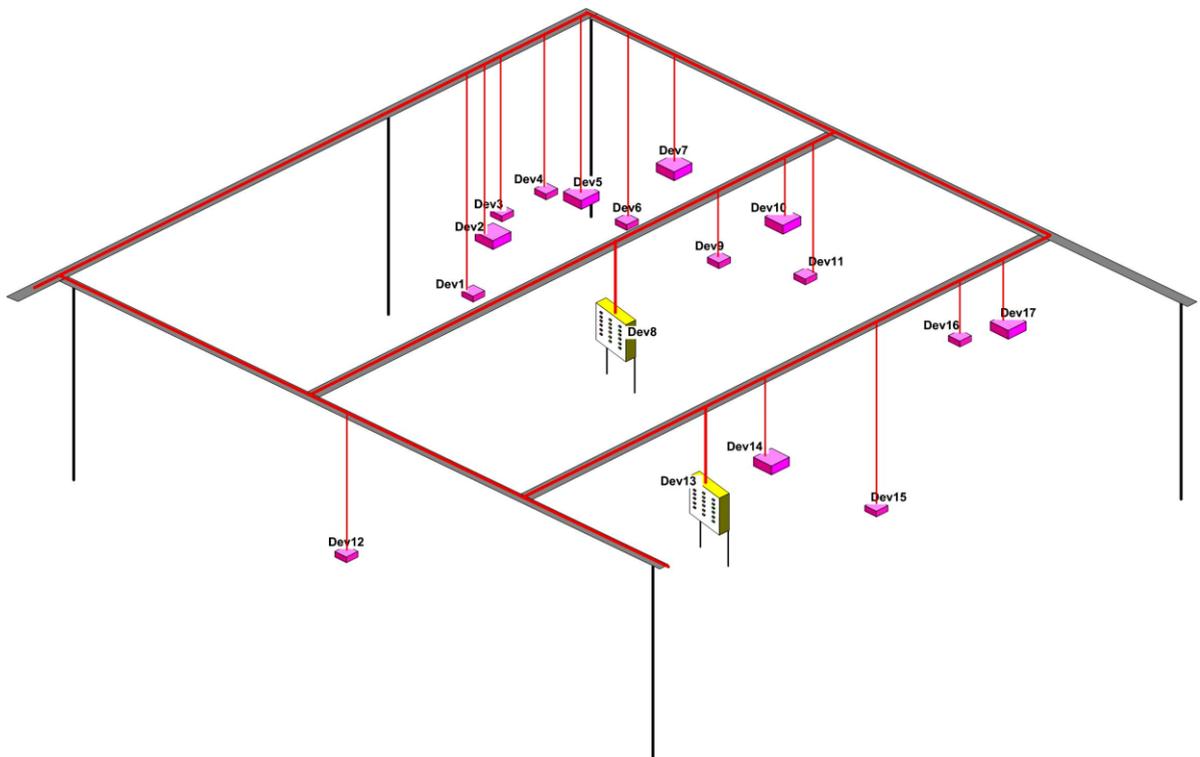


Рисунок 2.17 – Ізометрична модель електричного монтажу ТЗА на реальному ТП

Далі актор «Студент» доповнює тривимірну модель реального АТП програмно-технічними засобами оперативного та диспетчерського управління. Оперативне управління має здійснюватися через автоматизоване робоче місце оператора АТП, яке розташовується у окремому приміщенні. Диспетчерське управління періодичним виробництвом реального АТП має здійснюватися через автоматизоване робоче місце диспетчера виробництва, яке також повинно розміщуватися у окремому приміщенні.

На рисунку 2.18 показані відповідні доповнення тривимірної моделі реального АТП. Автоматизоване робоче місце диспетчера розміщено на другому поверсі будівлі, а оператора – на виробничій ділянці у окремій кімнаті.

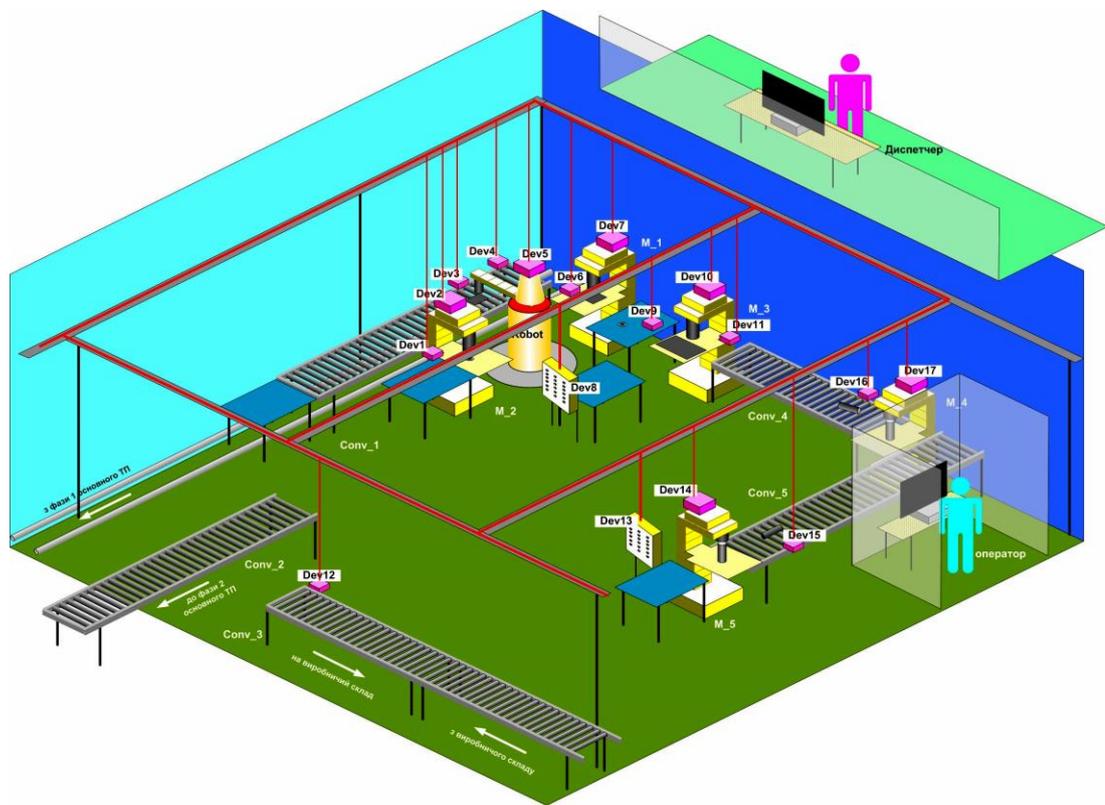


Рисунок 2.18 – Розміщення на ізометричній моделі АРМів оператора/диспетчера

Останнє, що повинен зробити актор «Студент», щоб отримати повну тривимірну модель реального АТП, це «прокласти» в приміщенні підприємства корпоративну цифрову мережу, яка з’єднає промислові контролери реального АТП та автоматизовані місця оператора та диспетчера (рисунок 2.19).

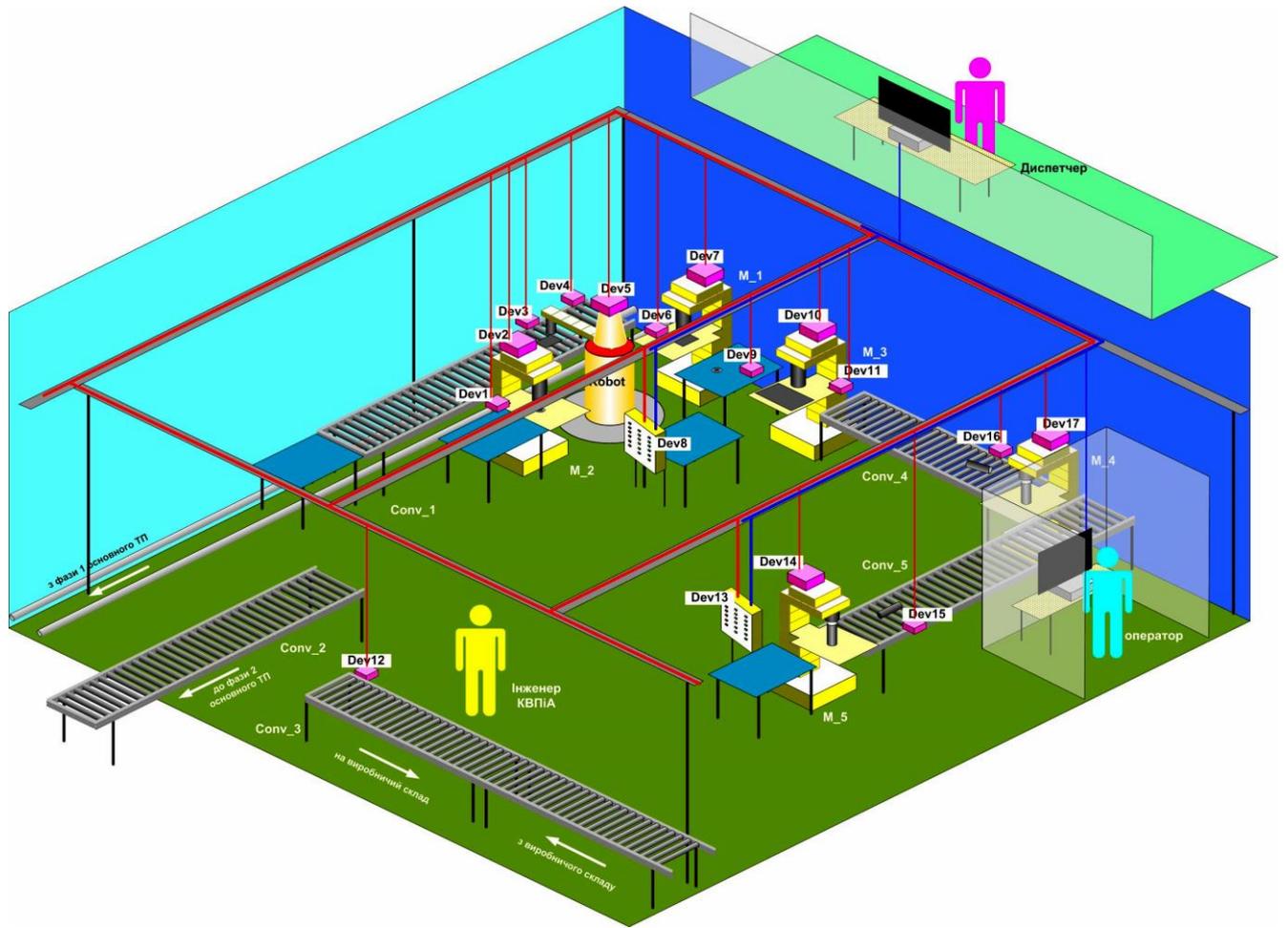


Рисунок 2.19 – «Монтаж» корпоративної цифрової мережі

На рисунку 2.19 показаний відповідальний працівник допоміжного виробництва – інженер з контрольно-вимірювальних пристроїв та автоматики (КВПіА), який обов’язково має спостерігати за роботою ТЗА та всієї системи управління в цілому, а також виконувати їх ремонт та налаштування.

## 2.4 Висновки до розділу

В результаті виконання дослідницьких та проектних робіт у даному розділі магістерської кваліфікаційної роботи була обґрунтована модель потоку робіт стадії «Моделювання існуючого автоматизованого ТП», який виконує і студент, і

викладач, в ході дослідження цифрової трансформації допоміжного виробництва промислового підприємства. Зроблений огляд та наведені приклади основних комп'ютерних моделей, що має розробляти викладач для навчально-методичного забезпечення навчального дослідження. Зроблений огляд та наведені приклади комп'ютерних моделей, що має розробляти студент в ході цього ж навчального дослідження.

В подальшому на основі цих комп'ютерних моделей студент зможе якісно виконати наступну стадію цифрової трансформації існуючого в лабораторії ТП допоміжного виробництва.

## **3 ПРОЄКТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИКОНАННЯ СТАДІЇ «АНАЛІЗ РЕАЛЬНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО ТП»**

### **3.1 Загальне бачення**

Цифрова трансформація існуючого ТП допоміжного виробництва, що вивчається на нових НЗ, як було вже зазначено вище, являє собою процес поступового перетворення студентами існуючого реального АТП, побудованого за рекомендаціями концепції комп'ютерно-інтегрованого виробництва «Індустрія 3.0» (І3.0), у досконаліший варіант даного АТП, що відповідає рекомендаціям перспективної концепції цифрового виробництва «Індустрія 4.0» (І4.0).

Вище була також запропонована загальна архітектура нових НЗ, яка відображає стадії цього процесу цифрової трансформації, кожна з яких складається з обов'язкових дій студента та викладача, виконуваних у певному порядку та з залученням відповідних програмно-технічних засобів.

Згідно з цією архітектурою, на стадії «Аналіз існуючого АТП» студент повинен порівняти будову та принцип дії реального АТП, існуючого у вигляді повного комплексу комп'ютерних моделей, а також сформованих уявлень студента, з властивостями більш досконалого АТП цифрового «розумного виробництва» і виявити в результаті такого порівняння основні недоліки існуючого реального АТП, склавши відповідний їх перелік.

Таким чином, загальне бачення процесу виконання даної стадії цифрової трансформації технологічного процесу допоміжного виробництва виглядає так, як показано на рисунку 3.1 і в додатку Б. На попередній стадії процесу цифрової трансформації розробляється повний комплект комп'ютерних моделей реального АТП, в результаті чого у студента формується повне уявлення про його будову та принцип дії. На стадії «Аналіз реального АТП» студент поступово порівнює властивості існуючого реального АТП (будова та принцип дії) з властивостями «розумного виробництва» (з точки зору його автоматизації), аналізує результат порівняння та складає перелік тих недоліків реального АТП, які далі можна буде усунути шляхом впровадження перспективних цифрових технологій.



Рисунок 3.1 – Загальне бачення процесу виконання стадії

Порівнювальний аналіз може виконуватися за участі викладача, наприклад, при наданні студенту відповідних консультацій або у підготовці інформації про властивості «розумного виробництва» (у вигляді навчально-методичних матеріалів). На жаль, на сьогодні ще не сформоване остаточне визначення поняття «розумне виробництво», де б перелічувались усі його основні властивості. Тому цю інформацію треба формувати шляхом відповідного дослідження предметної області «розумного виробництва». Це дослідження має самостійно виконувати студент, що сприятиме кращому розумінню ним процесу цифрової трансформації. Проте, готувати таку інформацію може і викладач, хоча це зменшуватиме ефективність навчання. У будь-якому випадку, після проведених досліджень властивості «розумного виробництва» (з точки зору автоматизації) можна представити у вигляді переліку його основних ознак. Складемо такий перелік.

«Розумне виробництво» у великій мірі є віртуальним, побудованим на використанні різноманітних цифрових копій (цифрових двійників) як технологічного обладнання та процесів, так і продукції, що виготовляється [34-39]. Цифрова копія (цифровий двійник) дозволяє виробникам проводити аналіз альтернативних сценаріїв і створювати віртуальні моделі своїх активів, виробів і процесів для рішення поточних і майбутніх завдань [34] (рисунок 3.2). Об'єднання технологій стирає границі між фізичними й цифровими системами, утворюючи так звані "кіберфізичні системи". Таким чином, цифрові копії дозволяють виробникам розробляти й оцінювати різні сценарії виробництва ще до початку їхнього застосування в реальних умовах.

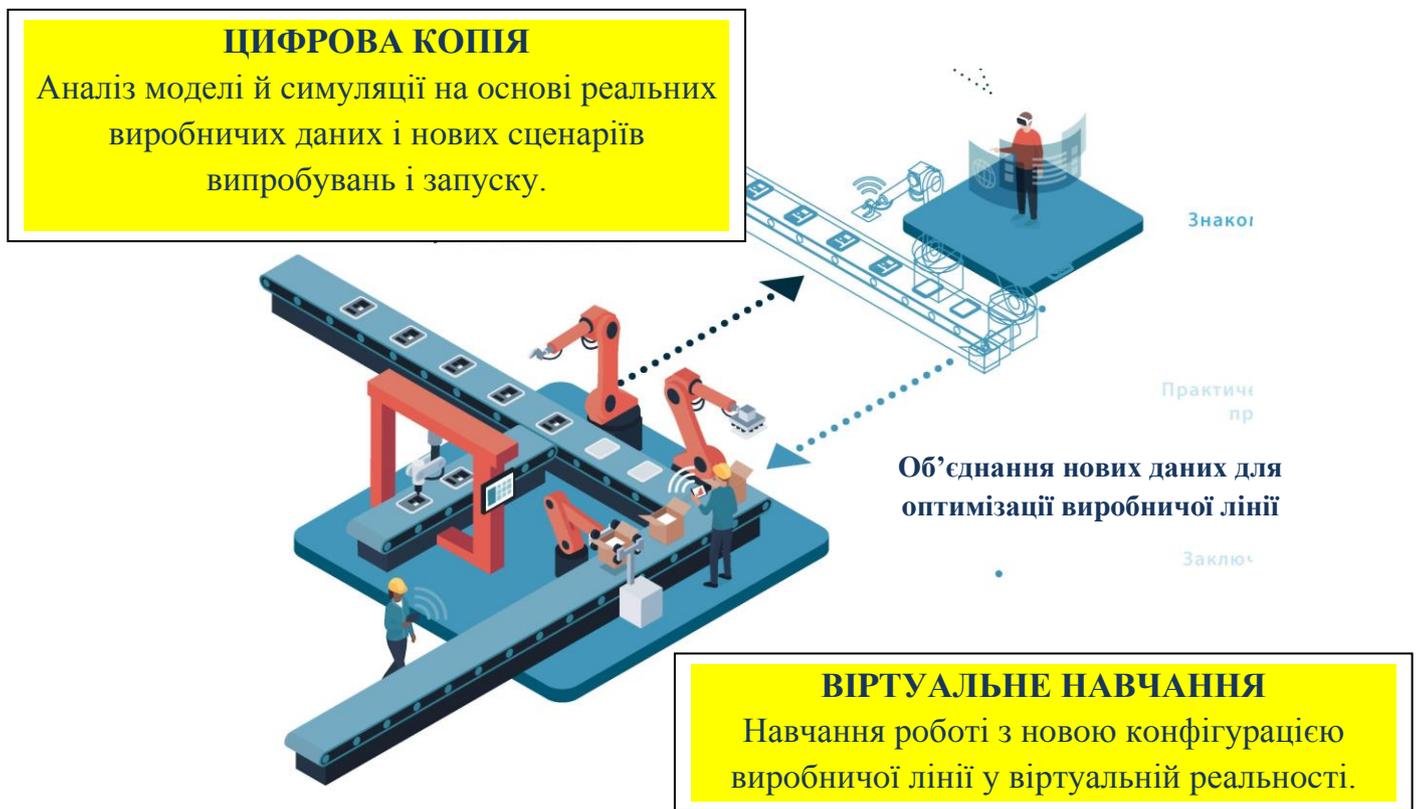


Рисунок 3.2 - Цифрова копія (цифровий двійник) у виробничій системі

При цьому на «розумному» виробництві вирішуються такі завдання:

– обмеження ризиків інвестицій у нові виробничі активи або модернізацію існуючих об'єктів за допомогою віртуальної симуляції, перевірки й оцінки

прогнозованих результатів;

- скорочення часу й витрат на "цифровізацію" існуючих даних для створення віртуальних моделей;

- управління безліччю варіантів готової продукції;

- моделювання виробничих процесів і перевірка функціонування ресурсів в умовах, наближених до реального;

- перевірка й тестування виробничих стратегій, процесів і продуктивності для розуміння роботи підприємства;

- скорочення часу й витрат за рахунок симуляції наслідків впровадження й модифікації продуктів або внесення змін у конфігурацію підприємства;

- виявлення й зниження ризиків виникнення взаємних залежностей і "вузьких місць" за допомогою аналізу альтернативних сценаріїв;

- забезпечення цифрової безперервності операцій по проектуванню продукції, виробничому проектуванню й виробництву;

- моделювання виробничих процесів у віртуальному середовищі на основі реальних обмежень і даних.

Використовуючи новітні 3D-сканери й технології аналітики, цифрова платформа «розумного» виробництва дозволяє означити виробничу ситуацію для швидкої візуалізації цеху й підтримки цифрової безперервності від етапу формування ідеї до виробництва продукту. Виробничі специфікації, технологічні плани й робочі інструкції в 3D можна прямо надати співробітникам виробничих цехів. У випадку внесення змін весь процес автоматично оновлюється за рахунок цифрової безперервності. Цифрова симуляція робочих процесів дозволяє проаналізувати показники використання активів, а також визначити, які процеси можуть бути небезпечними для оператора, автоматично розмістивши на них віртуальний манекен. За допомогою віртуального навчання оператори можуть навчатися працювати зі складальними станціями, використовуючи методи "покажіть мені", "допоможіть мені" і "дозвольте мені".

Для управління виробничими операціями все частіше використовуються підключені пристрої. Ці пристрої підключаються до верстатів, інструментів,

датчиків, RFID-міток, візків AGV і ін. Вони забезпечують більш високий рівень візуалізації операцій і захисту операторів, поліпшують контроль якості виробів і можливість відстеження. При цьому вирішуються такі основні завдання «розумного» виробництва:

- єдиний підхід до збору даних з різних джерел;
- швидке одержання виробничих даних з датчиків і збільшення обсягів одержуваних даних;
- бізнес-контекст даних про виробництво й обладнання для прийняття зважених рішень;
- моніторинг у реальному часі й підвищення продуктивності виробничих активів за допомогою промислового Інтернету речей (ІоТ);
- машинне навчання й аналітика для оптимізації використання активів;
- порівняльний аналіз продуктивності на декількох об'єктах на основі еталонних показників;
- автоматизація збору даних і скорочення числа неефективних рутинних завдань;
- використання оповіщень на основі даних і обробка виключень, зменшення часу простою й ризиків;
- використання контексту для рішення задач по якості за рахунок застосування комплексного набору типів даних і джерел;
- зручна й ефективна візуалізації для виявлення складних проблем, що впливають на якість;
- прийняття рішень на основі систем AI, що враховують широкий спектр проблем якості продукції й процесів.

Це дозволяє операторам прямо підключатися до пристроїв промислового Інтернету речей (ІоТ) (рисунок 3.3) і одержувати контекстні відомості в моделі даних. Перебуваючи на своїх робочих станціях, оператори можуть взаємодіяти з іншими робочими групами для рішення проблем або відправлення запитів. Співробітники різних відділів взаємодіють швидше й ефективніше завдяки інформації, до якої автоматично додається контекст проблеми. Створюється

підтримка процесів вибору оптимального часу для планових технічних робіт (до виникнення проблем і з найменшим впливом на показники обслуговування).



Рисунок 3.3 - Моніторинг роботи обладнання в реальному часі

Крім того, реалізується автоматичне відправлення зведень про замовлення на обслуговування на мобільні пристрої технічних фахівців.

Заставою успішного виробництва є ретельне планування. Оптимізація мережі створення цінності покаже, як усунути складності, оптимізувати планування ланцюжка поставок, поліпшити прозорість і ефективність. Для цього на «розумному» виробництві вирішуються такі завдання (рисунок 3.4):

- підтримка й перевиконання виробничих показників;
- максимальне використання активів;
- скорочення витрат на експлуатацію, персонал і обслуговування;
- оптимізація продуктивності для виконання зобов'язань по обслуговуванню й перевищення очікувань клієнтів;
- безперервна підтримка балансу між виробничими параметрами для

досягнення оптимальних результатів у рамках бізнес-цілей;

– підвищення точності зведень про нерозподілені запаси за рахунок одержання фактичної картини обмежень мережі створення цінності;

– динамічна зміна термінів для зменшення наслідків від витратних виробничих збоїв;

– скорочення запасів без впливу на виробництво;

– поліпшення перевезень і скорочення витрат на поставки за допомогою оптимізованого складання маршрутів.



Рисунок 3.4 - Оптимізація мережі створення цінності

Наприклад, при обстеженні керівник транспортного відділу «розумного» виробництва може перевірити графік виробничих робіт і з'ясувати необхідність у перевезеннях. При аналізі можна одержувати миттєвий зворотний зв'язок про графік для своєчасного запобігання потенційних конфліктів. Для візуалізації доступне використання необмеженого числа сценаріїв, що дозволяє вивчати альтернативні варіанти й визначати вплив плану на КПЕ до його публікації.

Оптимізація забезпечує безперервне вдосконалювання процесу формулювання допущень на основі даних від співробітників, що виконують роботи. Використовується також управління плануванням взаємодії зі співробітниками, що виконують роботи, у реальному часі й зворотний зв'язок для відстеження.

Таким чином, виробництво стає комплексним, а підключені ринки, що стрімко розвиваються, створюють додаткові складності. Щоб успішно вирішувати завдання, які ставить світова економіка в епоху цифрових технологій, виробникам потрібні ефективні можливості візуалізації й контролю. Це забезпечить персоналізовану й емоційну взаємодію із клієнтами, яким більше не потрібні просто товари й послуги.

На думку MCKINSEY & COMPANY, найбільш успішними стануть компанії, які будуть орієнтуватися на наступні шість факторів успіху [34]:

- орієнтація на прибутковість технологій, а не їхню зовнішню привабливість;
- впровадження комплексного й спеціалізованого набору технологій з можливістю масштабування;
- реалізація перетворень, починаючи з вищого керівництва, і комунікація з усіма співробітниками (повідомлення про результати, історію успіху);
- комплексний підхід до цифровізації із продуманою концепцією й поетапним планом розвитку підприємства і його екосистеми;
- створення спеціалізованої екосистеми технологічних партнерів і керування ними;
- створення рівних можливостей для співробітників і культури, орієнтованої на підтримку успіху.

Аналізуючи усі наведені вище приклади застосування цифрових технологій на «розумному виробництві» будь-якого цифрового підприємства, побудованого за концепцією «Індустрія 4.0», можна виділити основні його властивості, що характеризуються відповідними ознаками. Ці ознаки можна віднести до таких трьох груп: «Економічні ознаки», «Технічні/функціональні ознаки» та «Соціальні/суспільні ознаки» (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Основні ознаки «розумного виробництва» І4.0

Ознака	Коротка характеристика
1	2
<b>Економічні ознаки</b>	
Висока виробнича ефективність (КПЕ)	Конкуренція й споживчий попит впливають на показники ефективності та продуктивності виробництва. Одне з "простих" рішень підвищення ефективності – ощадливе виробництво, або швидкий вивід нової продукції на ринок. Більш складні рішення – зниження ризиків, удосконалення процесів і прогнозування показників продуктивності за допомогою об'єднання потужних можливостей віртуального середовища й реального світу, де люди використовують машини для трансформації виробництва. Тобто для безперервного вдосконалення виробництва потрібна постійна його оптимізація. При цьому недостатньо самого прагнення до безперервного вдосконалення, а необхідні ресурси й технології для досягнення цієї мети.
Нові бізнес-моделі управління виробництвом	Засновані на тім, що цінність визначається не тільки самим виробом, але й знаннями й ноу-хау, які пов'язані із цим виробом. Успішними стають ті компанії, які оперативно впроваджують знання й ноу-хау серед своїх співробітників і в ланцюжках створення цінності. При цьому ці ланцюжки мають розгортатися у мережі, які об'єднуюватимуть можливості реального й віртуального світів для розробки, впровадження й спільного використання стійких інновацій, а також для безперервного вдосконалення цих можливостей за допомогою аналітики користувальницького досвіду (горизонтальна інтеграція структурної моделі бізнесу – value networks).
Висока якість продукції	Комплексне управління якістю в реальному часі в масштабі всього підприємства. Цифрова підтримка забезпечення якості, відстеження й доступу до історичних цифрових даних про деталі, процеси й ресурси. 3. Забезпечення швидких дій по усуненню неполадок і проблем з якістю.
<b>Технічні/функціональні ознаки</b>	
Цифрова виробнича система	Поєднує обладнання, системи, площадки, клієнтів і партнерів. В ній зібрані цифрові дані про розробку, навчання, виготовлення й торгівлю. Вона охоплює всі галузі економіки й суспільства. Цифровізація – це засіб одержання бажаного результату, а саме гнучкого виробництва, що приносить клієнтам відмінний результат, а власникам – більш високий прибуток. Наприклад, аналіз цифрових даних (поточних чи накопичених в системі) алгоритмами штучного інтелекту (AI) веде до поглиблення знань про виробничу систему та, як наслідок, до її подальшого вдосконалення.

Продовження таблиці 3.1

1	2
Віртуалізація виробничого середовища	Віртуальне виробниче середовище, як правило, створюється й управляється на основі інфраструктури спеціальної віртуальної платформи. Ця інфраструктура дозволяє візуалізувати і контролювати у віртуальному середовищі те, що неможливо фізично побачити в реальному світі, - єдину промислову екосистему. При цьому новітні цифрові технології забезпечують можливість ефективної роботи у віртуальному виробничому середовищі.
Абсолютна гнучкість виробничих процесів	Споживчий попит може раптово змінитися, нові технології миттєво стають революційними і тому виробничі процеси повинні бути більш гнучкими й такими, що налаштовуються у відповідності зі змінами. При цьому оперативність - локальна або глобальна - стає вкрай важливою. Наприклад, швидкий вивід нової продукції на ринок є запорукою отримання максимальних прибутків. Знання типових потреб користувача й можливість адаптації до них продуктів і потоків операцій у реальному часі дають чимало переваг.
Децентралізація (Decentralization)	Перенесення децентралізованого та автономного прийняття рішень до машин та кіберфізичних систем, в тому числі, і до автономних системних елементів (модулі, системи обробки матеріалу та продукту), що розміщені де завгодно на рівні виробництва. Головною метою є надати кіберфізичним системам можливість приймати рішення без втручання централізованого управління (людини чи машини).
Здатність до взаємодії (Interoperability)	Означає можливість розповсюдження технічної інформації поза (або між) системними компонентами «розумного виробництва». Така бізнес інформація може бути далі розповсюджена між виробничими підприємствами, постачальниками та покупцями (споживачами). Таким чином, «розумне виробництво» повинно легко підключатися до глобальної мережі аналогічних виробничих систем та цифрових ланцюгів поставок.
Висока стійкість (надійність)	Розвинені функції раннього попередження аварійних/нештатних виробничих подій та й прогнозного обслуговування виробничих активів.
Здатність до безперервної й нескінченної самооптимізації	Розвивається з метою адаптації до змінюваних бізнес-цілей організації. Наприклад, впроваджує адитивне виробництво, яке дає можливість самостійно виробляти унікальні компоненти й деталі, з меншими витратами. Кіберфізичні системи (Cyber-physical systems, CPS) відіграють ключову роль в цій постійній зміні технології і процесу. Вони надають додаткових можливостей фізичним системам завдяки злиттю можливостей комп'ютерних обчислень і зв'язку з фізичними процесами. Наприклад, вони дають можливість реалізувати у фізичному світі значно складніші виробничі процеси.

Продовження таблиці 3.1

1	2
Функціональна безпека	У міру усе більш широкого впровадження нових технологій і мереж, все більшої інтеграції розумних підприємств, все більшого значення набуває високий рівень кібернетичної безпеки «розумного» виробництва.
<b>Соціальні/суспільні ознаки</b>	
Новий характер людської праці	Щоб використовувати весь потенціал Індустрії 4.0, необхідні зміни на ринку праці відповідно до мінливих вимог і, як результат, у концепціях навчання, тому що саме люди - ключовий фактор успіху. Конвергенції інформаційних (ІТ) і операційних технологій (ОТ) вимагає наявності висококваліфікованих фахівців – системних інтеграторів, які здатні продемонструвати свої уміння та знання в конкретних аспектах «підключеного підприємства». Хоча Industry 4.0 замінює більшість робочих місць автоматизацією, проте, вона також і створює багато робочих місць, але з іншим характером праці.
Екологічна безпека	Скорочення кількості браку й відходів, що сприяє екологічно безпечнішій діяльності підприємства. Застосування більш екологічно безпечних процесів, що оптимально споживають енергоресурси й зменшують забруднення навколишнього середовища
Ергономічна безпека	Повне усунення людської праці з небезпечних та тяжких процесів виробництва; надання працівникам вдосконалених засобів захисту від дії небезпечних виробничих факторів, комплексного моніторингу середовища та попереджувальної сигналізації.
Принципово нові продукти (продукція)	Створення та швидкий вивід на ринок товарів, що використовують або нові технології (літаючі такси, окуляри доповненої реальності), або вдовольняють новим потребам користувачів (електричні автомобілі, цифрові екскурсоводи, цифровий метавесвіт), або вимагають використання при виготовленні нових технологій (3D-принтери металом або цифрове моделювання процесів).

Розроблений перелік основних властивостей «розумного виробництва» дає достатнє уявлення про його переваги перед виробництвом І3.0 в цілому. Тобто на основі цих ознак можна вже виконувати загальний порівняльний аналіз обох видів виробництв. Але для навчального порівнювального аналізу треба розробити такий його алгоритм, який би враховував структурну будову виробництв, яка включає різні компоненти – процеси, обладнання, функції, дані тощо.

### 3.2 Розробка алгоритму виконання аналізу

Для виконання порівнювального аналізу спочатку треба вибрати ту структурну будову АТП, яку далі використовувати в якості взірця. У нас є вже структура існуючого реального АТП (у вигляді повного комплексу комп'ютерних моделей), яка ґрунтується на концепції І3.0. Проте у світовій практиці вже існує і структура АТП «розумного виробництва, що ґрунтується на концепції І4.0.

Виходячи з навчально-методичних міркувань, буде більш доцільним взяти за взірець структурної будови саме останній варіант АТП, тобто той, що має бути отриманий в результаті цифрової трансформації існуючого реального АТП. По-перше, властивості «розумного виробництва», виявлені вище, ідеально суміщаються саме з цією структурою, по-друге, відсутність якогось компонента структури І4.0 у складі структури існуючого реального АТП можна буде зразу вважати його недоліком, тобто сам процес аналізу спрощується.

На даний час структурну будову «розумного підприємства» І4.0 та його «розумного виробництва» регламентують декілька стандартних моделей, які називаються референтними [40-43]. Така референтна модель надає загальну структуру та мову для пояснення та специфікації системної архітектури, що, відповідно, сприяє поліпшенню загального розуміння та системної взаємодії. При архітектурному описі цифрових виробничих платформ рівняння на референтну модель є дуже корисним, бо вона надає каркас для стандартизації відповідних технічних систем, від їх розробки, подальшої інтеграції і до їх дії.

Референтні моделі для побудови «розумних фабрик» за концепцією «Industry 4.0» (І4.0) є новою областю дослідження, яка вимагає зараз особливої уваги, враховуючи нові парадигми Інтернету та кіберфізичних систем для промисловості. Загалом, референтні моделі для І4.0 у певній мірі базуються на Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture (СІМOSA) та стандарті ІSA-95.

СІМOSA – це заснований на подіях підхід до моделювання процесів виробництва у інтегрованому комп'ютеризованому каркасі. Стандарт ІSA-95 є архітектурною моделлю, що описує інтеграцію функцій підприємства та

керуючих систем. Вона утворює ієрархічну структуру виробничих систем, починаючи від технологічних процесів і закінчуючи вищим рівнем, тобто бізнес логістикою.

Саме на цій основі розроблена архітектурна модель побудови «розумної фабрики» Reference Model for Industrie 4.0 (RAMI 4.0) [40]. Ця уніфікована референтна модель архітектури забезпечує колективне розуміння стандартів, що створені для реалізації концепції «Industry 4.0» (I4.0).

Дана модель може бути інструментом для означення різних концепції в рамках I4.0, так і їх практичних використань. В цій моделі окремі компоненти I4.0 описуються на рівні їх структури та функцій. Модель вимагає формулювання вимог щодо конкретного застосування з метою опису та подальшої розробки I4.0 концепцій та продуктів. Модель RAMI 4.0 базується також на Smart Grid Architecture Model (SGAM), яка була розроблена у свій час для комунікацій у мережах джерел відновлюваної енергії, але стала корисною і для I4.0.

Референтна модель RAMI 4.0, що показана на рисунку 3.5, базується на трьохвимірній системі координат – «Життєвий цикл та потік формування цінності» (Life Cycle & Value Stream), «Шари» (Layers) та «Ієрархічні рівні» (Hierarchy Levels). Дана еталонна архітектурна модель була представлена на «Hannover Messe – 2015». Вона призначена для використання при системній організації та подальшій розробці концепцій та технологій в рамках I4.0.

Проте, в окремих випадках використання моделі RAMI 4.0 виявляється непростим завданням через її складність і незвичність тривимірного подання.

Треба відмітити, що при розробці архітектурної моделі RAMI 4.0 як основна область застосування розглядалося саме промислове виробництво. При цьому спектр цього виробництва простирається від дискретного до безперервного його типів. Фокус на промисловому виробництві відрізняє проєкт майбутнього Industrie 4.0 від сформульованих у більш широкому контексті принципів IoT (Internet of Things) Міжнародного консорціуму промислового Інтернету (ІІС).

Архітектурна модель I4.0 вимагала тільки тривимірного зображення. Треба обов'язково описати, по-перше, ієрархічні рівні виробничої установки, об'єднаної в мережу за допомогою Інтернет, по-друге, життєвий цикл установки й продукції,

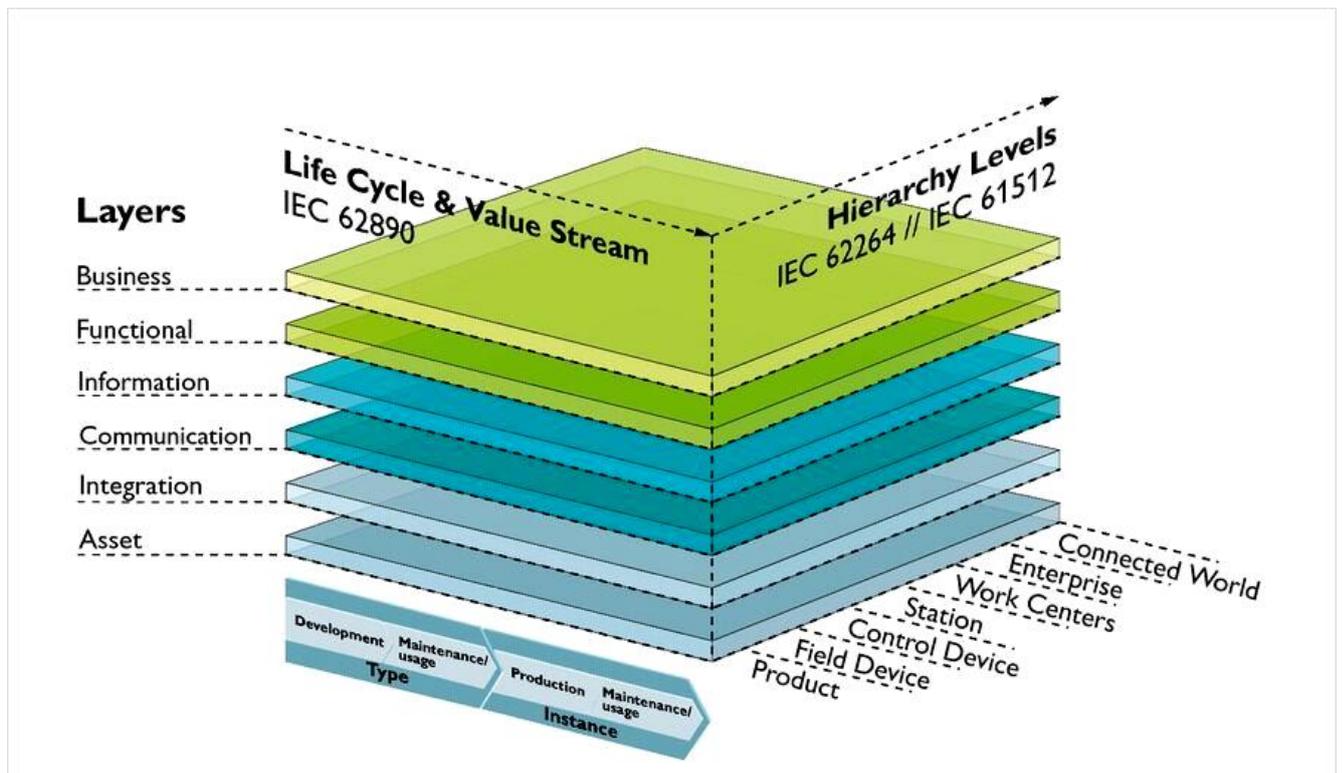


Рисунок 3.5 - Референтна архітектурна модель RAMI 4.0

по-третє, IT-представлення компонентів I4.0. Такі описи і проводяться саме на відповідних трьох осях моделі RAMI 4.0. При цьому ієрархічні рівні в основному збігаються з рівнями піраміди автоматизації, що описана стандартами ISA 95 та ISA 88 [44].

Опис життєвого циклу установок і продукції з відповідними ланцюжками створення вартості (цінності) орієнтується на структуру стандарту MEK 62890 [44], що робить різницю між типом і екземпляром (рисунок 3.6).

Тип продукту створюється на декількох етапах у процесі розробки. Процес розробки завершується після затвердження спеціальної версії виробу.

На основі типу, затвердженого для серійного виробництва, установка створює потім вироби, які є екземплярами даного типу.

Припинення випуску компонентів або модернізація можуть зажадати внесення змін у продукцію.

Зміни вносяться в тип, і, після завершення й затвердження коректування, на виробництво надходить уже нова версія виробу.

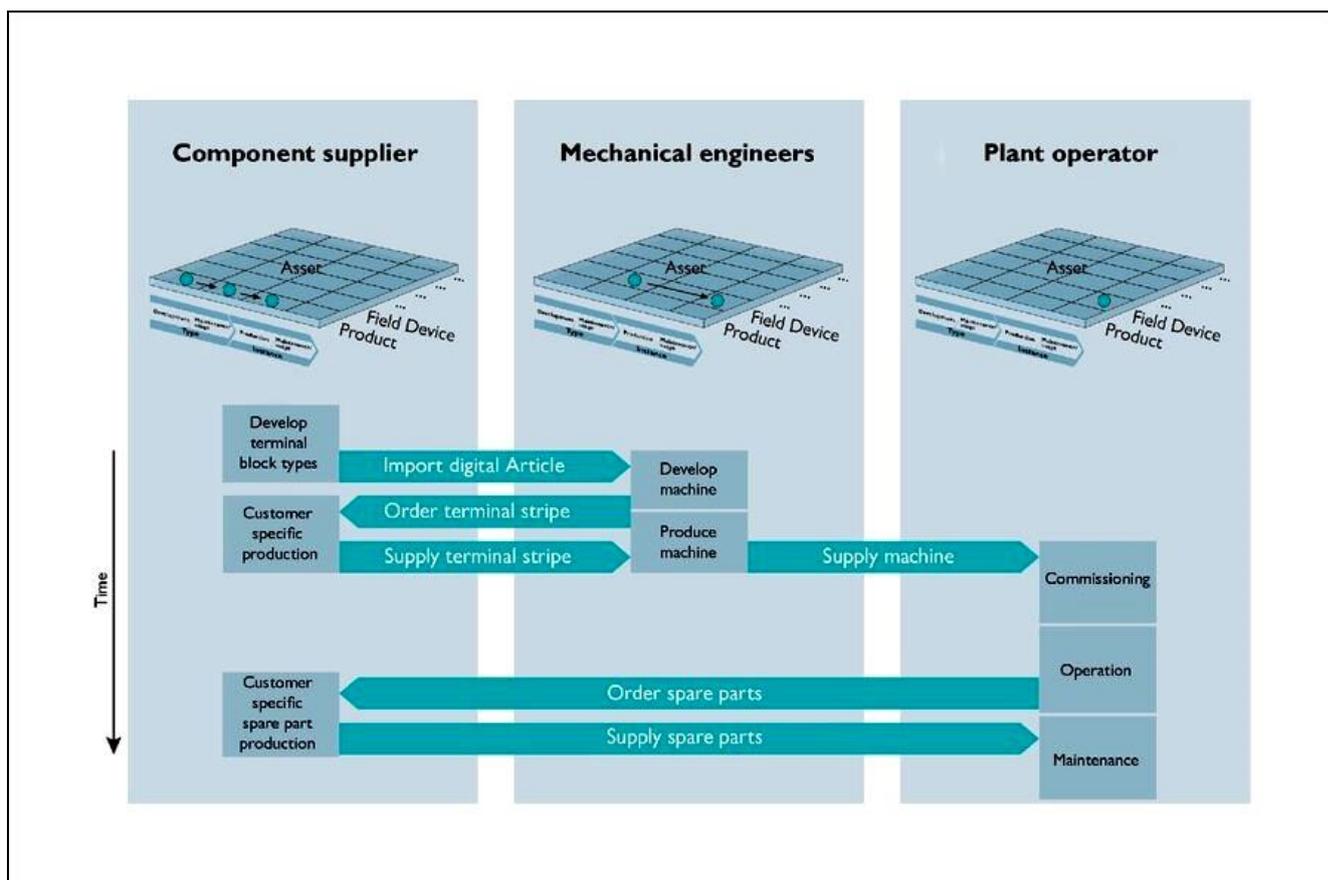


Рисунок 3.6 – Рольове представлення в моделі RAMI 4.0

Уже сьогодні численні дані, що створюються (генеруються) в рамках трьох ланцюгів процесу, надаються в цифровому вигляді. Потім вони обробляються в системах PLM і ERP. Виробництво індивідуальних виробів вимагає можливості зберігання даних, які замовник передав виробникові для виготовлення своїх екземплярів, у відповідній формі й в електронному вигляді в ІТ-системах разом з даними, що стосуються до екземплярів. Вони повинні бути доступні протягом усього життєвого циклу екземпляра й прив'язані до відповідного типу.

Візуалізація ІТ-представлення компонента І4.0 провадиться на вертикальній осі за допомогою шести згрупованих один над іншим шарів (Layer). Шари відображають підхід до розуміння бізнес-процесів, функціональних описів, образів даних, параметрів зв'язку, включаючи Quality of Service (QoS), а також залученню ресурсів за допомогою шару інтеграції (Integration Layer). Крім таких фізичних елементів, як компоненти, машини, установки й кабелі, шар ресурсів

(Asset Layer) охоплює також дані, отримані в процесі розробки.

Як ресурс можна також розглядати дані по конкретному екземпляру, отримані в процесі виробництва й частково є унікальними для кожного клієнта.

Розподіл всіх ресурсів забезпечує додаткові можливості в області менеджменту ресурсів (Asset Management) за рахунок унікальної ідентифікації всіх компонентів I4.0. Крім того, подібний сценарій спрощує аналіз загроз для виробничої установки, який варто виконувати для забезпечення інформаційної безпеки.

Також архітектурній моделі присутні і інші шари IT-представлення «розумної фабрики». Шар бізнесу (Business) означає бізнес модель, загальний процес та правила, яким система повинна слідувати. Він гарантує інтеграцію функцій у потоці формування цінності. Він також забезпечує регуляторні та легальні умови каркасу. Бізнес шар також організує дію сервісів функціонального шару та аналізує події, що інформують про прогрес у виконанні бізнес процесу.

Функціональний шар (Functional): забезпечує середовище виконання та моделювання для сервісів, які підтримують бізнес шар. Віддалений доступ та горизонтальна інтеграція мають місце у функціональному шарі, окрім процесів, що мають лише відношення до нижчого шару (наприклад, читання діагностичних даних), або тих, що не мають відношення до постійної функціональної та горизонтальної інтеграції (наприклад, технічне обслуговування).

Інформаційний шар (Information): містить сервіси, які уможливають прийом, використання та обслуговування даних, використовуваних, генерованих або модифікованих технічною функціональністю активів (ресурсів). Це передбачає постійність даних, забезпечення, інтеграцію та цілісність. Цей шар приймає події від фізичних активів (ресурсів) через шари нижчого рівня та виконує адекватне оброблення та перетворення для підтримки сервісів функціонального шару.

Шар комунікацій (Communication): забезпечує уніфіковані комунікацію та формати даних, що дозволяє здійснювати доступ до інформації, та забезпечує інтерфейси для доступу до функцій активу (ресурсу) з боку інших активів (ресурсів).

Шар інтеграції (Integration): представляє перехід з фізичного світу до інформаційного світу. Цей шар містить представлення властивостей та пов'язаних з процесами функцій активу (ресурсу) та оголошує події з фізичного світу. Також шар включає документацію, ПЗ та програмоване обладнання активу (ресурсу), або людино-машинний інтерфейс (НМІ).

Таким чином, в процесі цифрової трансформації АТП допоміжного виробництва в якості структурних компонентів для його порівнювального аналізу ми будемо використовувати усі ті архітектурні компоненти, які зазвичай відображаються на референтній моделі RAMI4.0, а саме:

- компоненти, що розміщуються на різних ієрархічних рівнях системи автоматизації (продукт, польовий пристрій, пристрій управління і т.д.);
- компоненти, що відображаються на різних шарах ІТ - представлення системи автоматизації (актив/ресурс, інтеграція, комунікація, інформація, функціонал, бізнес);
- компоненти, що відображають різні процеси у часі (розробка типу продукту/системи, обслуговування типу продукту/системи, виробництво екземпляру продукту/системи, обслуговування екземпляру продукту/системи і т.д.).

Послідовність пошуку вказаних компонентів в існуючому реальному АТП, їх порівнювальний аналіз з властивостями «розумного виробництва» та означення виявлених недоліків має проводитись студентом у певному порядку.

На рисунку 3.7 та в додатку Б наведений алгоритм виконання студентом за участі викладача даної стадії цифрової трансформації, який пропонується для використання у нових НЗ.

Як було вже відмічено вище, студент починає виконувати дану стадію цифрової трансформації, маючи повний комплект комп'ютерних моделей реального АТП та сформоване особисте уявлення про його будову та принцип дії.

В першу чергу студент повинен згрупувати усі наявні в реальному АТП архітектурні компоненти по двох висях архітектурної моделі RAMI4.0 – «Ієрархічні рівні» (Hierarchy Levels) та «Шари» (Layers). В результаті він отримає

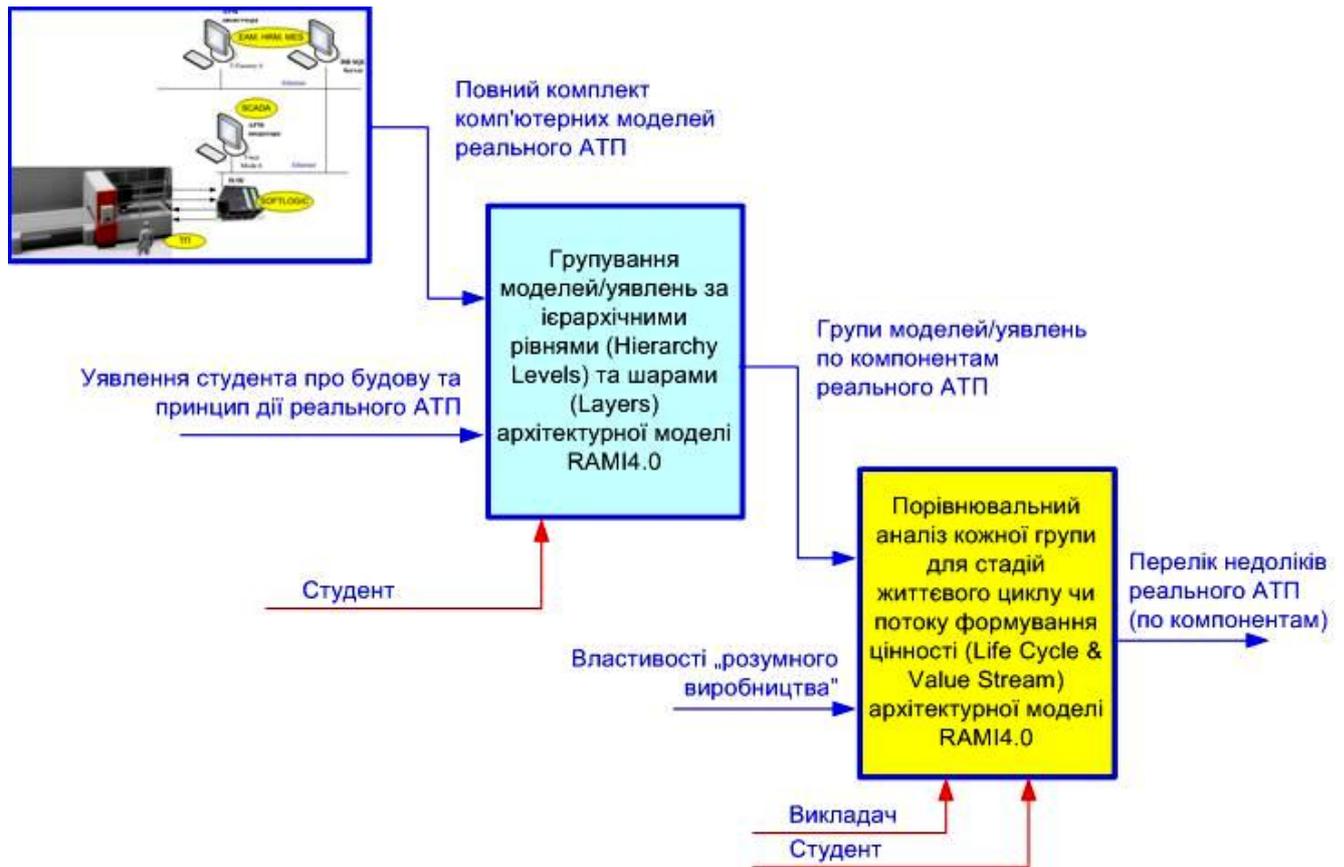


Рисунок 3.7 – Алгоритм виконання стадії «Аналіз реального АТП»

комплект з кількох груп компонентів існуючого реального АТП, кожна з яких має своє призначення (роль) у системі автоматизації, тобто забезпечує відповідну її властивість або властивості.

Далі студент має розглядати кожний компонент у кожній групі послідовно на різних стадіях його життєвого циклу та потоку формування цінності (Life Cycle & Value Stream).

При цьому студентом для кожної стадії життєвого циклу та потоку формування цінності виконується порівняння властивості самого компоненту або властивості, що цей компонент надає існуючому реальному АТП, з, відповідно, властивостями «розумного виробництва» в цілому або з властивостями його аналогічного компоненту.

В результаті формується перелік виявлених недоліків існуючого реального АТП в цілому чи його компонентів у порівнянні з усім АТП «розумного

виробництва» чи з окремими його компонентами, що відображені на референтній архітектурній моделі RAMI4.0.

### 3.3 Приклад виконання аналізу

Розглянемо приклад використання запропонованого алгоритму. Візьмемо довільний фрагмент існуючого реального АТП допоміжного виробництва, ізометрична модель якого показана на рисунку 3.8. Вона відображує виконання окремої фази ТП – виготовлення напівфабрикату банки. Ця фаза починається з ручної операції, здійснюваної робочим, по переміщенню заготовки у верстат, який далі за допомогою встановленого інструменту в автоматичному режимі виготовляє напівфабрикат банки. Після цього готовий напівфабрикат робочий забирає із верстату та кладе на конвеєр, який рухає заготовки далі до наступної фази ТП.

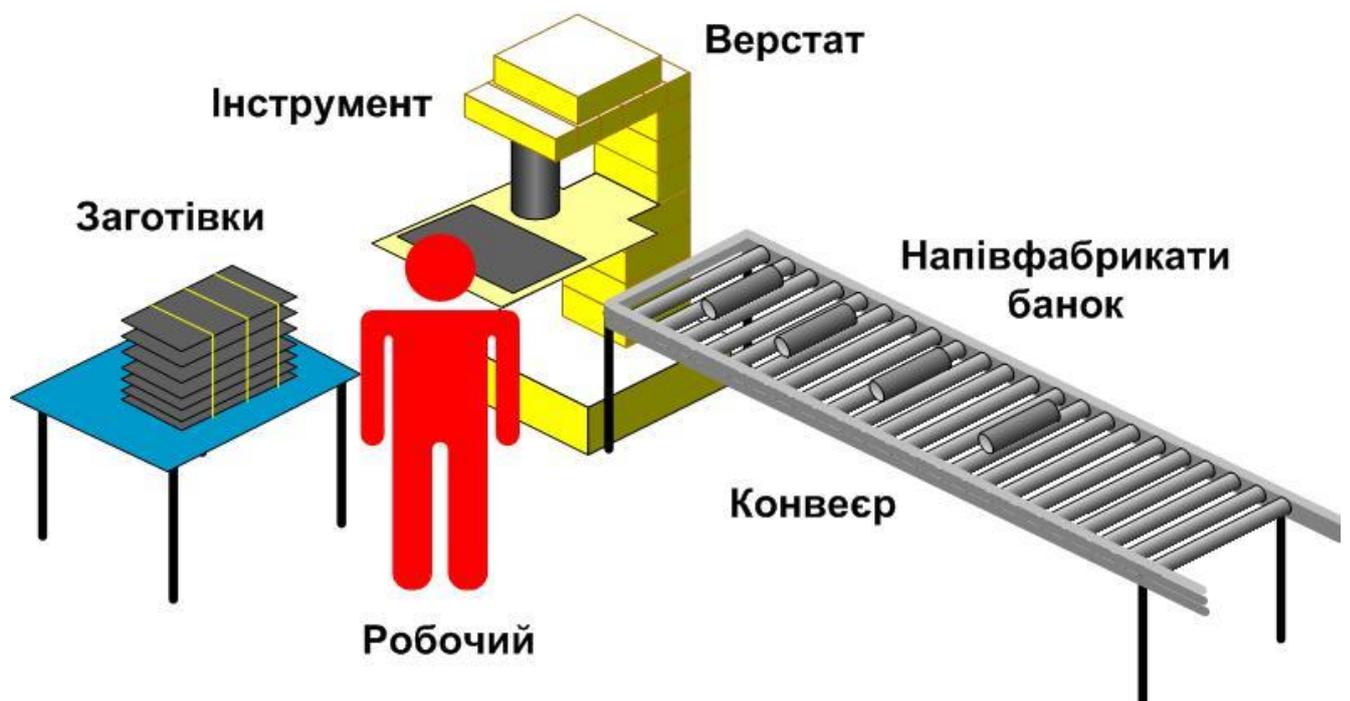


Рисунок 3.8 – Фрагмент реального АТП для виконання порівняльного аналізу

Спочатку, згідно з описаним вище алгоритмом, виділимо усі складові компоненти даного фрагменту існуючого АТП – заготівка банки визначеного типу (Заготівка), робочий, який здійснює ручні операції даної фази ТП (Робочий), автоматичний верстат, який виконує наступну технологічну операцію (Верстат) за допомогою встановленого спеціального інструменту (Інструмент), готовий напівфабрикат банки певного типу, зроблений верстатом у автоматичному режимі (Напівфабрикат) та промисловий конвеєр, який переміщує готову заготівку банки до наступної фази ТП (Конвеєр).

Тепер розподілимо ці компоненти по групах у відповідності з ієрархічними рівнями (Hierarchy Levels) моделі RAMI4.0, як це показано на рисунку 3.9 та в додатку Б. В нашому прикладі усі виділені вище компоненти відносяться до одного рівня – «Product» (продукція, виробниче встаткування та виробничі системи). Тому переносимо усі ці компоненти на даний рівень моделі.

Далі переходимо до вісі «Layers» моделі RAMI4.0, означуючи на ній відповідні активи/ресурси реального АТП, які важливі для ІТ - відображення реального АТП. Тут треба відмітити, що для нашого прикладу, беручи до уваги саме навчальну мету цих дій, ми вказуємо у шарі «Asset» вісі «Layers» тільки ці шість компонентів з ієрархічного рівня «Product». Якщо б в нашому прикладі був присутній компонент рівня «Control Device», який, наприклад, керує верстатом або конвеєром, то в шарі «Asset» ми повинні були б означити ще і ті цифрові дані, які використовує цей пристрій управління. Проте, в нашому прикладі такого керуючого пристрою немає, тому і не потрібно в шарі «Asset» вказувати такий актив/ресурс як цифрові дані.

Переходимо далі по вісі «Layers» у шар «Integration». Тут можна означити ті об'єднання компонентів (інтеграційні зв'язки), які важливі для функціонування даного фрагменту реального АТП. В нашому випадку важливі чотири об'єднань виділених компонентів:

- «Заготівка», «Робочий» та «Верстат», що позначено як «1» (забезпечує виконання першої ручної операції ТП);
- «Інструмент», «Верстат» та «Робочий», що позначено як «2» (забезпечує виконання першої машинної операції ТП та можливої ручної заміни інструмента);

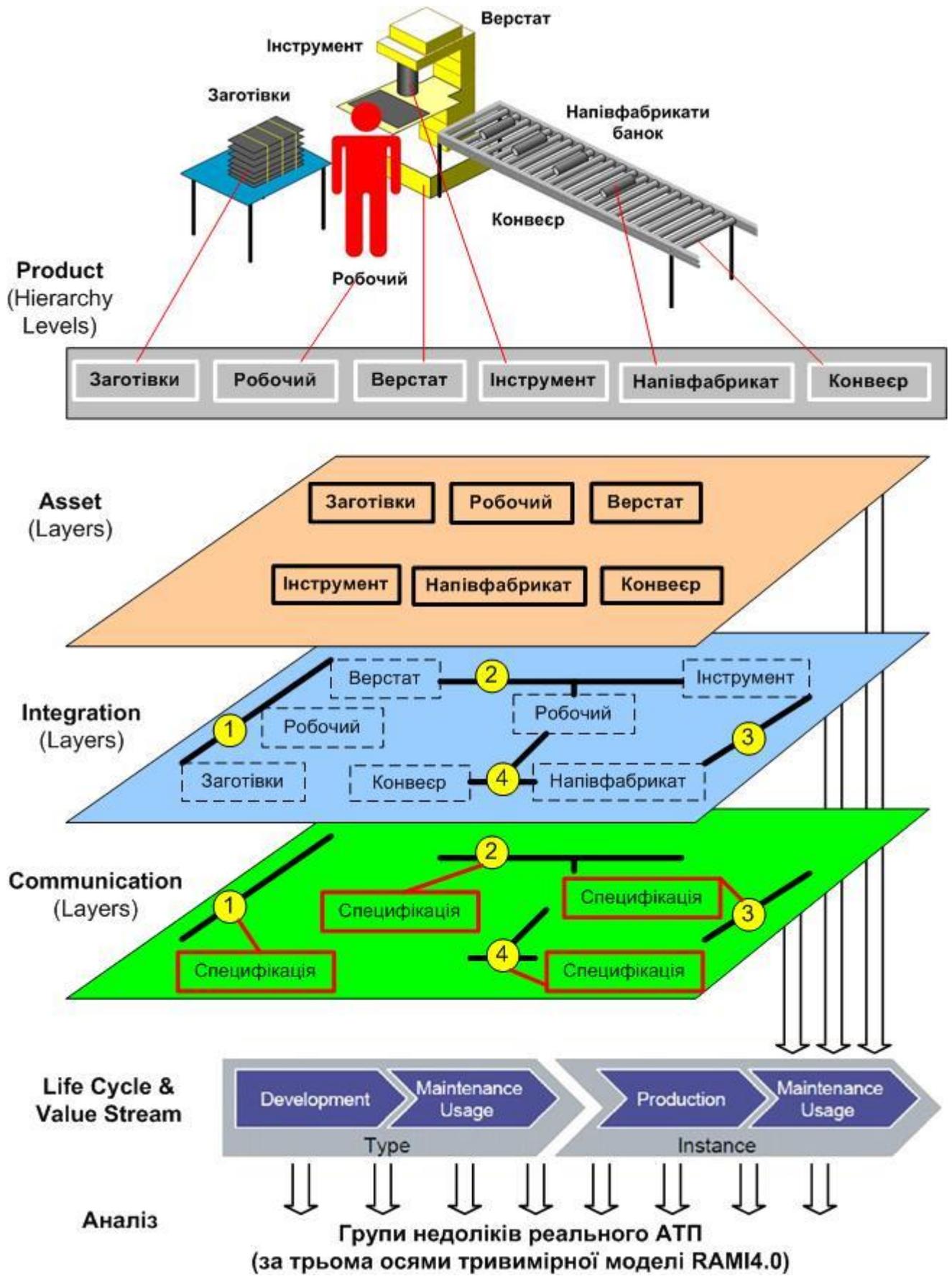


Рисунок 3.9 – Приклад виконання порівнювального аналізу для фрагмента реального АТП

– «Інструмент» та «Напівфабрикат», що позначено як «3» (забезпечує можливість верстату виготовляти конкретний тип напівфабрикату);

– «Напівфабрикат», «Робочий» та «Конвеєр», що позначено як «4» (забезпечує виконання другої ручної операції ТП).

Слід обов'язково відмітити, що на практиці у шарі «Integration» для АТП «розумного виробництва» повинні відображатися зовсім інші об'єднання, а саме, інтеграція даного «розумного виробництва» з віддаленими у мережі Інтернет іншими «розумними виробництвами» або з НМІ працівників. Тобто за визначенням модель RAMI4.0 не призначена для опису існуючого реального АТП, яке відноситься до І3.0. Але ми, виходячи тільки з навчально-методичних міркувань, свідомо змінюємо призначення даного шару моделі RAMI4.0 для того, щоб створити умови для подальшого виконання порівнювального аналізу існуючого реального АТП.

Тепер перейдемо у шар «Communication», де опишемо тим чи іншим способом властивості вказаних вище чотирьох інтеграційних зв'язків (об'єднань), позначивши ці описи як «1 Специфікація», «2 Специфікація», «3 Специфікація» та «4 Специфікація».

В результаті всіх виконаних вище дій ми сформуємо такі групи компонентів існуючого реального АТП допоміжного виробництва для проведення їх аналізу у порівнянні з властивостями «розумного виробництва»:

– «Заготівки», «Робочий», «Верстат», «Інструмент», «Напівфабрикат» та «Конвеєр» (компоненти ієрархічного рівня «Product» інтегрованої системи автоматизації);

– «Заготівки», «Робочий», «Верстат», «Інструмент», «Напівфабрикат» та «Конвеєр» (компоненти шару «Asset» вісі «Layers» ІТ – представлення інтегрованої системи автоматизації);

– «1», «2», «3» та «4» (компоненти шару «Integration» вісі «Layers» ІТ – представлення інтегрованої системи автоматизації);

– «1 Специфікація», «2 Специфікація», «3 Специфікація» та «4 Специфікація» (компоненти шару «Communication» вісі «Layers» ІТ –

представлення інтегрованої системи автоматизації).

Проведемо далі порівнювальний аналіз компонентів кожної з цих груп для окремих стадій їх життєвого циклу та потоку формування цінності, складаючи при цьому перелік недоліків існуючого реального АТП. Для прикладу далі наведемо тільки окремі з цих недоліків, які можна виявити в результаті такого порівнювального аналізу.

Так, компонент «Робочий» інтегрованої системи автоматизації виробництва (вісь ієрархічних рівнів) для стадії використання (Usage) у порівнянні з властивістю/ознакою «Висока виробнича ефективність (КПЕ)» «розумного виробництва» (див. таблицю 3.1) має обмежену продуктивність. Також присутність компонента «Робочий» в існуючому реальному АТП суперечить властивостям/ознакам «Новий характер людської праці» та «Ергономічна безпечність» I4.0 «розумного виробництва», які виключають з виробничого процесу будь-яку тяжку та монотонну людську працю.

Розглядаючи компонент «Робочий» у шарі «Asset» вісі «Layers» ІТ – представлення інтегрованої системи автоматизації, можна зробити висновок, що цей компонент на стадії «Usage» не контролюється даною системою, бо в існуючому реальному АТП немає жодних цифрових даних, які інформують у реальному часі про його дії, тому ці дії, так само як і бездіяльність, можуть порушити хід технологічного процесу, а система управління не зможе вчасно відреагувати на це. Тобто таке використання в реальному АТП ручної операції суперечить і властивості/ознаці I4.0 «розумного виробництва» – «Висока стійкість (надійність)» (див. таблицю 3.1). Крім того, відсутність в інтегрованій системі даних реального часу про дії компонента «Робочий» не відповідає такій властивості/ознаці «розумного виробництва», як «Цифрова виробнича система», яка передбачає обов'язкову наявність усіх потрібних цифрових даних про дії компонентів системи у реальному часі для оперативного реагування на ці дані.

Те ж саме стосується компонентів «Верстат», «Інструмент» та «Конвеєр» у шарі «Asset» (вісь «Layers») для стадії «Usage», бо це обладнання реального АТП не укомплектоване усіма потрібними спеціальними датчиками, цифрові дані з яких могли б дозволити системі управління або виключити випадки браку при

автоматичному виготовленні банок (тобто реальний АТП не відповідає І4.0 властивості/ознаці «Висока якість продукції»), або виявляти можливість поламки/нештатної зупинки обладнання і оперативно реагувати на це (тобто реальний АТП не відповідає І4.0 властивості/ознаці «Висока стійкість (надійність)»), або швидко адаптуватися до зміни виду продукції та тари, яку треба буде виготовляти тим же самим верстатом (тобто реальний АТП не відповідає І4.0 властивості/ознаці «Абсолютна гнучкість виробничих процесів»).

Якщо ж розглянути компоненти «Верстат», «Інструмент», «Заготівка» та «Напівфабрикат» у шарі «Asset» вісі «Layers», але для стадії проектування (Development) їх життєвого циклу, то у порівнянні з І4.0 властивістю/ознакою «Віртуалізація виробничого середовища» вони всі мають такий недолік – при проектуванні даного технологічного процесу не використовувались цифрові моделі вказаних компонентів, що в результаті не дає змоги моделювати і їх сумісну дію в режимі реального часу з прив'язкою до віртуального виробничого середовища, оптимізуючи ці дії або пристосовуючи їх до різних типів компонентів «Заготівка», «Інструмент» та «Напівфабрикат».

Розглянувши далі, наприклад, інтеграційний зв'язок «З», що відображений у шарі «Integration» вісі «Layers» ІТ – представлення інтегрованої системи автоматизації (див. рисунок 3.9), можна для стадії використання (Usage) життєвого циклу та у порівнянні з властивістю/ознакою І4.0 «Абсолютна гнучкість виробничих процесів» виявити такий його суттєвий недолік – при зміні типу тари, в яку має наливатися готова продукція, треба розробляти новий інструмент для верстату, щоб він міг виготовляти напівфабрикат нового типу, проте, якщо зміна типу тари буде кардинальною, то може статися, що взагалі для даного верстату неможливо буде створити відповідний інструмент, що поставить питання або придбання нового верстату, або відмови від оновлення типу тари. У деякій мірі цей недолік є наслідком попереднього виявленого недоліку для стадії проектування - відсутність цифрових моделей компонентів реального АТП та неможливість із-за цього імітаційного моделювання взаємодій верстата, заготівки та інструменту для виготовлення нового типу напівфабрикату.

Усі перелічені недоліки конкретного фрагменту існуючого реального АТП насправді складають невелику частку тих недоліків, які можна було б виявити шляхом ретельного порівнювального аналізу усіх компонентів даного АТП за описаним вище алгоритмом. Тобто навчальний потенціал проєктованої стадії практичного вивчення студентом цифрової трансформації є дуже великим.

### **3.4 Висновки до розділу**

В результаті виконання дослідницьких та проектних робіт у даному розділі магістерської кваліфікаційної роботи було сформоване загальне бачення процесу виконання стадії «Аналіз реального автоматизованого ТП» при дослідженні цифрової трансформації ТП допоміжного виробництва промислового підприємства. На основі цього бачення був розроблений деталізований алгоритм виконання робіт студентом та викладачем в рамках даної стадії навчального дослідження. Для пояснення практичного виконання такого алгоритму наведений приклад процесу виконання аналізу існуючого АТП та виявлення його недоліків у порівнянні з властивостями/ознаками «розумного виробництва» І4.0.

## **4 ЗАКЛЮЧНА СТАДІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ РЕАЛЬНОГО АТП**

### **4.1 Означення основних діяльностей**

На цій стадії дослідження цифрової трансформації реального АТП допоміжного виробництва студент та викладач мають виконувати відповідні дослідницькі роботи у визначеному порядку для досягнення кінцевої мети – набуття студентом потрібного обсягу теоретичних знань та практичного досвіду, достатніх для самостійного виконання цифрової трансформації реального промислового підприємства, де студент потім буде працювати.

На рисунку 4.1 наведена відповідна модель потоку означених робіт в рамках заключної стадії дослідження цифрової трансформації (ЦТ) реального АТП допоміжного виробництва. Виконання даної стадії дослідження ЦТ починається з етапу «Пошук способу цифрової трансформації існуючого реального АТП», що побудований за концепцією І3.0 і тому має суттєві недоліки, що виявлені на попередній стадії. Тому в результаті його цифрової трансформації потрібно отримати більш досконалий АТП допоміжного виробництва, побудований вже за концепцією І4.0. Даний етап студент повинен виконувати самостійно, але викладач має обов'язково надавати йому відповідний навчально-методичний матеріал, консультації та додаткові роз'яснення.

Після того, як студент намітить шляхи вдосконалення реального АТП допоміжного виробництва, вибравши відповідний спосіб чи способи цифрової трансформації, він має обґрунтовано вибрати І4.0 цифрову технологію чи технології, які дозволять реалізувати ці вдосконалення. Щоб кваліфіковано здійснити цей вибір студент обов'язково повинен ретельно дослідити предметну область І4.0 промислової автоматизації, використовуючи при цьому як доступні ресурси Інтернет, так і наявні навчально-методичні матеріали, підготовлені викладачем в рамках відповідної професійної дисципліни або проектного практикуму.

Коли потрібна технологія або технології цифрової трансформації будуть

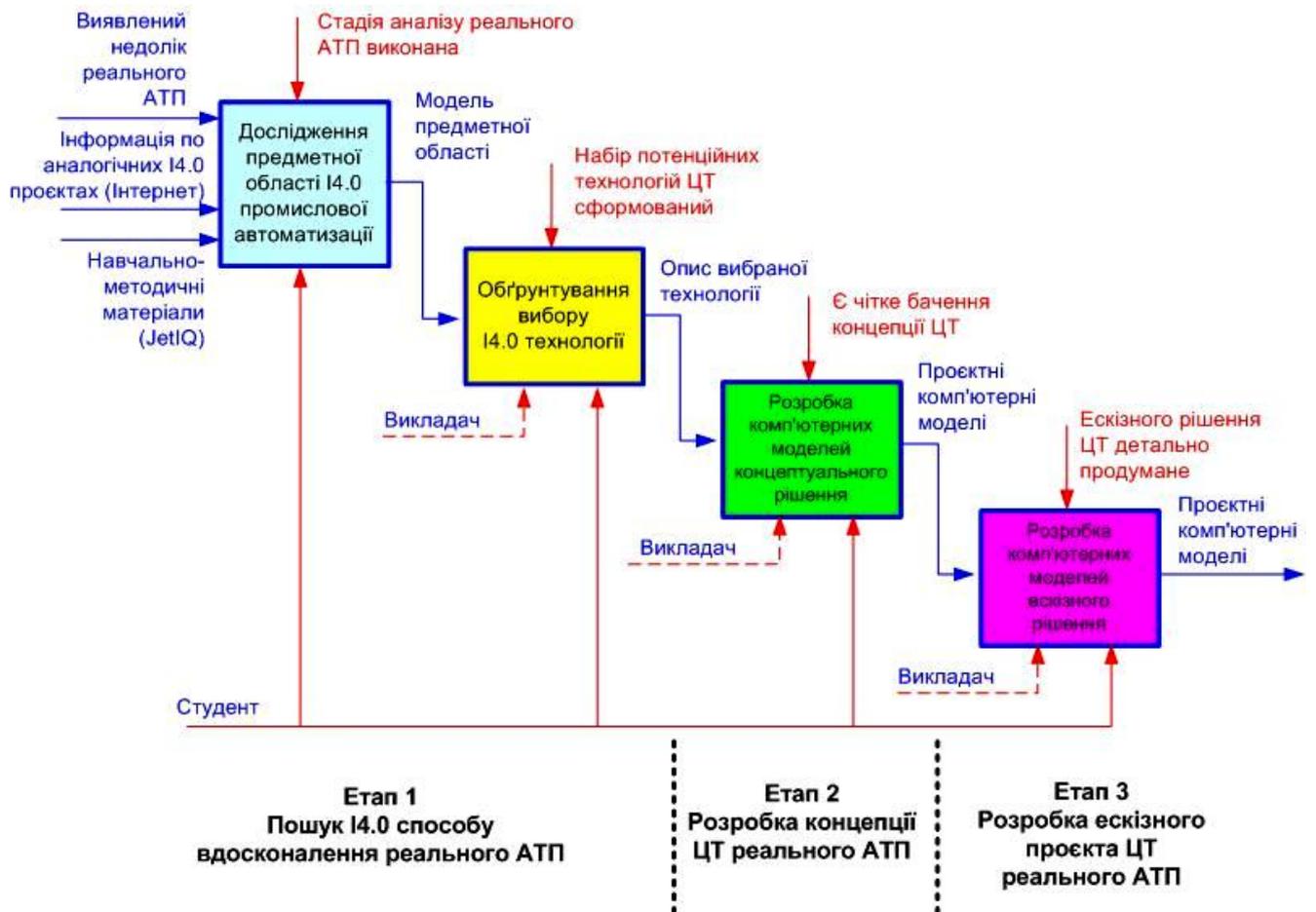


Рисунок 4.1 – Модель потоку робіт заключної стадії дослідження цифрової трансформації реального АТП

обґрунтовано вибрані, то студент має переходити до виконання наступного етапу – «Розробка концепції цифрової трансформації реального АТП». На цьому етапі для представлення свого бачення цієї концепції студент може використовувати як доступні хмарні сервіси цифрового моделювання того чи іншого виду, так і наявні локальні програмні засоби такого моделювання. Готовий проєкт, що відображає запропоноване концептуальне рішення цифрової трансформації реального АТП допоміжного виробництва, буде першим результатом практичного вивчення студентом процесу цифрової трансформації за допомогою нових НЗ. Бажано, щоб цей практичний результат студент отримав в ході навчального процесу бакалаврського рівня підготовки, наприклад, це може бути навчальний процес у рамках професійної дисципліни «Кіберфізичні системи

автоматизації виробництва».

Якщо студент продовжить навчання в магістратурі вузу, то він зможе на основі описаного вище концептуального рішення цифрової трансформації реального АТП допоміжного виробництва продовжити дослідження його цифрової трансформації, виконуючи наступний його етап – «Розробка ескізного проєкту цифрової трансформації реального АТП». Цей етап характеризується більшою деталізацією проєктних рішень і також передбачає активне використання студентом як доступних хмарних сервісів цифрового моделювання того чи іншого виду (наприклад з цифровою симуляцією поведінки трансформованого АТП), так і наявних локальних програмних засобів такого моделювання. Результатом діяльності студента на цьому етапі стане ескізний проєкт цифрової трансформації реального АТП допоміжного виробництва, який повинен бути представлений у вигляді відповідних комп'ютерних моделей статички та динаміки трансформованого АТП допоміжного виробництва. Усі розроблені студентом комп'ютерні моделі ескізного проєкту повинні мати формат, що дозволить викладачу без проблем переглядати їх або на комп'ютерах навчальної лабораторії, або на доступних хмарних сервісах цифрового моделювання, або за допомогою наявних локальних програмних засобів моделювання. Таким чином, ескізний проєкт стане заключним результатом дослідження цифрової трансформації реального АТП допоміжного виробництва на нових НЗ. Цей практичний результат може бути досягнутий або в рамках професійної дисципліни магістерського рівня підготовки, наприклад, «Промисловий Інтернет речей», або в рамках відповідного проєктного практикуму.

#### **4.2 Дослідження предметної області I4.0 промислової автоматизації**

Ця діяльність є однією з найбільш складних та тривалих в ході виконання заключної стадії цифрової трансформації реального АТП. Вона пов'язана не тільки з трудомістким процесом збирання потрібної інформації та її відповідного

оброблення, але і з процесом поступового її осмислення студентом, в результаті чого обсяг накопичених студентом теоретичних знань має перерости у відповідну якість – здатність самостійно використовувати ці знання при практичному вирішенні конкретної задачі цифрової трансформації.

Тому для дослідження предметної області І4.0 промислової автоматизації треба спочатку вибрати той науковий метод дослідження, за яким студент, використовуючи доступні інформаційні ресурси, зможе отримати потрібний результат. На наш погляд, найкращим науковим методом для даного дослідження є метод онтологічного аналізу, який дозволяє на основі вибраної концепції досить швидко виявити базові поняття предметної області (базові об'єкти) та базові відношення між ними (базові «зв'язки»).

Якщо студент в ході дослідження буде ще будувати і відповідну графічну концептуальну модель предметної області, то це принесе йому ще більше користі в процесі осмислення інформації та формування глибокого розуміння суті І4.0 промислової автоматизації.

На рисунку 4.2 наведений варіант побудови такої графічної концептуальної моделі предметної області І4.0 промислової автоматизації.

В якості відправної точки її будування вибране класичне означення промислової кіберфізичної системи (КФС), яка є фундаментом промислової автоматизації за концепцією І4.0, – «Кіберфізична система промислової автоматизації – це людська праця, «розумні» машини й транспорт, інтегровані в єдиному цифровому просторі за допомогою мереж, «розумних» пристроїв, сенсорних систем, аналітичних платформ і хмарних обчислень» [45]. Усі наведені у цьому означенні поняття (базові об'єкти) зв'язані між собою класичними відношеннями (базові «зв'язки»), які відображені на класичній графічній моделі предметної області промислових КФС.

Ця класична модель на рисунку 4.2 розміщена в середині моделі у площині базових об'єктів та «зв'язків» І4.0.

Нижче та вище площини базових об'єктів та «зв'язків» І4.0 поміщені площини, де відображується подальший розвиток І4.0 промислової автоматизації по відношенню до класичного її бачення.

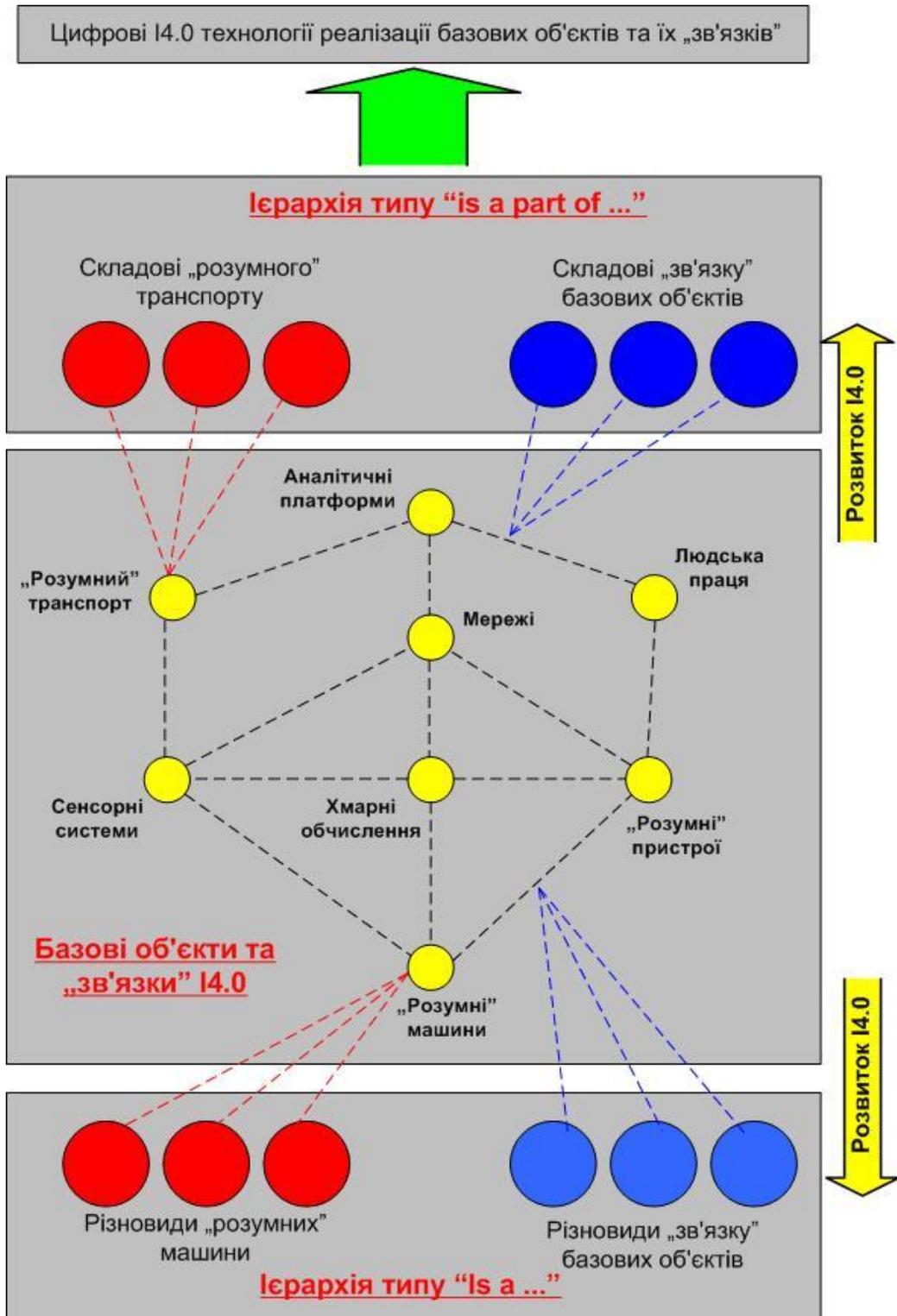


Рисунок 4.2 – Варіант графічної концептуальної моделі предметної області І4.0 промислової автоматизації

Знизу розміщена площина, у якій відображаються різновиди базових об'єктів та «зв'язків», які поступово виявляються в ході онтологічного аналізу предметної області. Тобто ці відображення зв'язані з базовими об'єктами та

«зв'язками» через ієрархію типу «is a ...» («є ... (чимось)»). По мірі розвитку І4.0 промислової автоматизації кількість варіантів базових об'єктів та «зв'язків» стрімко збільшується, що пояснюється і новими областями застосування ідей четвертої промислової революції, і швидкою появою нових цифрових технологій, які уможливають реалізацію нових варіантів І4.0 об'єктів та «зв'язків».

Зверху в моделі на рисунку 4.2 поміщена площина, у якій відображаються складові базових І4.0 об'єктів та «зв'язків». Тобто ці відображення зв'язані з базовими об'єктами та «зв'язками» через ієрархію типу «is a part of ...» («є частиною ... (чогось)»). Це найбільш змінювана за контентом область даної моделі, бо швидка поява нових цифрових технологій та розширення областей цифрової трансформації промислового виробництва призводять до інших технічних рішень вихідних базових І4.0 об'єктів та «зв'язків». Наприклад, нещодавно з'явилося нове поняття, яке означено як «АІоТ», тобто додані «розумні» пристрої автоматизації, які підключені до Інтернету речей (одна складова), виконують свої функції на основі реалізованих в них алгоритмів штучного інтелекту (друга складова). Такого інтегрованого виконання «розумних» пристроїв раніше не було.

Яким же чином студент може далі використовувати таку графічну концептуальну модель предметної області? По-перше, в ході оброблення інформації він вже може виявляти практичні задачі, які вирішувались при цифровій трансформації аналогічних АТП. При цьому він буде бачити у який спосіб вирішувались проблеми цих АТП (шлях цифрової трансформації). По-друге, студент буде бачити, які саме цифрові технології вирішують аналогічні задачі (на рисунку 4.2 показано угорі). По-третє, коли кількість осмисленої інформації перейде у якість, то студент зможе генерувати власні проєктні ідеї.

Для прикладу розглянемо аналіз деякої статті у науково-технічному журналі [46], що присвячена питанням впровадження ідей «Індустрія 4.0» на виробництві. Далі у лапках наведена частина тексту цієї статті. «Для реалізації системи «розумного виробництва» й концепції «Індустрії 4.0» потрібна велика кількість сучасних розробок, що включають у себе програмно-апаратний комплекс рішень. Мережа управління, на відміну від звичайної мережі, чутлива

до часу проходження сигналу, а передача сигналів між комп'ютерами повинна відбуватися блискавично без яких-небудь затримок, щоб уникнути потенційного пошкодження продукції або травм персоналу. Чутливі до часу мережі організуються по провідній системі через кабелі Ethernet.

Використання Інтернету речей і адаптація даної технології для використання в промисловості (отримала назву «промисловий Інтернет речей») робить граничні кінцеві точки інтелектуальними, забезпечуючи обмін даними між комп'ютерами по фізичній або бездротовій мережі, що дозволяє уникнути потенційних затримок і втрат при роботі через головний центр управління.

Використання даних, зібраних з датчиків і виходів обладнання підприємства, може бути використане для створення бази статистичних даних для подальшого прийняття рішень по процесах. Цей відкладений у часі аналіз використовується для обґрунтування довгострокових рішень і виявлення проблем більш високого рівня. Наприклад, .... ознаки нестабільної роботи, що вказують на очікувану найближчим часом відмову обладнання, тому може бути завчасно замінений, щоб запобігти обов'язкового простою всієї виробничої лінії.

Штучний інтелект у системах розумного виробництва обробляє дані, що надходять з датчиків і виходів обладнання, і робить відповідні дії залежно від результату обробки даних. На відміну від концепції великих даних, де дані збираються для подальшого аналізу, що проходить, як правило, у віддаленому Центрі обробки даних (ЦОД), штучний інтелект прагне негайно приймати рішення або посилати сигнал відповідальному персоналу, ґрунтуючись на поточних показаннях. Наприклад, можна використовувати системи відеоспостереження для визначення зон обмеженого доступу й подачі сигналу тривоги співробітникам охорони у випадку несанкціонованого проникнення в цю зону....».

В такому невеликому тексті вже можна виявити багато сучасних цифрових технологій, які відіграють зараз ключову роль у цифровій трансформації виробництва. Ті поняття та окремі словосполучення, що вказують на існуючу І4.0 цифрову технологію, відмічені підкреслюванням. По суті, це дороговкази подальшого дослідження даної предметної області.

### 4.3 Ескізний проєкт початкової стадії цифрової трансформації АТП

У розділі 1 розглядалась найбільш поширена зараз стратегія цифрової трансформації існуючого виробництва, яка передбачає покрокове виконання цього процесу – спочатку проєктуються та реалізуються рішення, які не вимагають великих коштів та витрат часу, але призводять до реального поліпшення справ на виробництві, далі виконуються наступні кроки, що пов'язані вже з реалізацією більш глибоких змін як процесів виробництва, так і діяльності людей, отримуються їх позитивні результати і т.д. Саме за цією стратегією студенти і мають виконувати проєктні роботи на нових НЗ в ході практичного вивчення цифрової трансформації існуючого реального АТП допоміжного виробництва.

В якості прикладу такого проєктування на початковій стадії цифрової трансформації розробимо ескізний проєкт, який матиме на меті надання цьому АТП таких властивостей/ознак І4.0 «розумного виробництва» як «Цифрова виробнича система» та «Здатність до взаємодії (Interoperability)». В результаті цього в існуючому реальному АТП допоміжного виробництва буде генеруватися додатковий обсяг цифрової виробничої інформації, що покращить його інформаційну прозорість у процесі управління, а також буде створена можливість розповсюдження через глобальну мережу технічної та бізнес інформації даного АТП як серед відповідальних працівників промислового підприємства, так і поза ним, наприклад, серед аналогічних виробничих систем або цифрових ланцюгів поставок. Однією з найбільш розповсюджених цифрових технологій, за допомогою якої можна вирішити таку проєктну задачу, є «Хмарні платформи промислового Інтернету речей (IIoT)».

Одну з таких платформ, а саме «ThingWorx Foundation» від компанії PTC [47, 48], ми на практиці вивчали в дисциплінах «Кіберфізичні системи автоматизації виробництва» бакалаврського рівня підготовки та «Промисловий Інтернет речей» магістерського рівня підготовки (рисунок 4.3). Тому для ескізного проєктування цифрової трансформації існуючого реального АТП допоміжного виробництва застосуємо саме цю хмарну платформу.

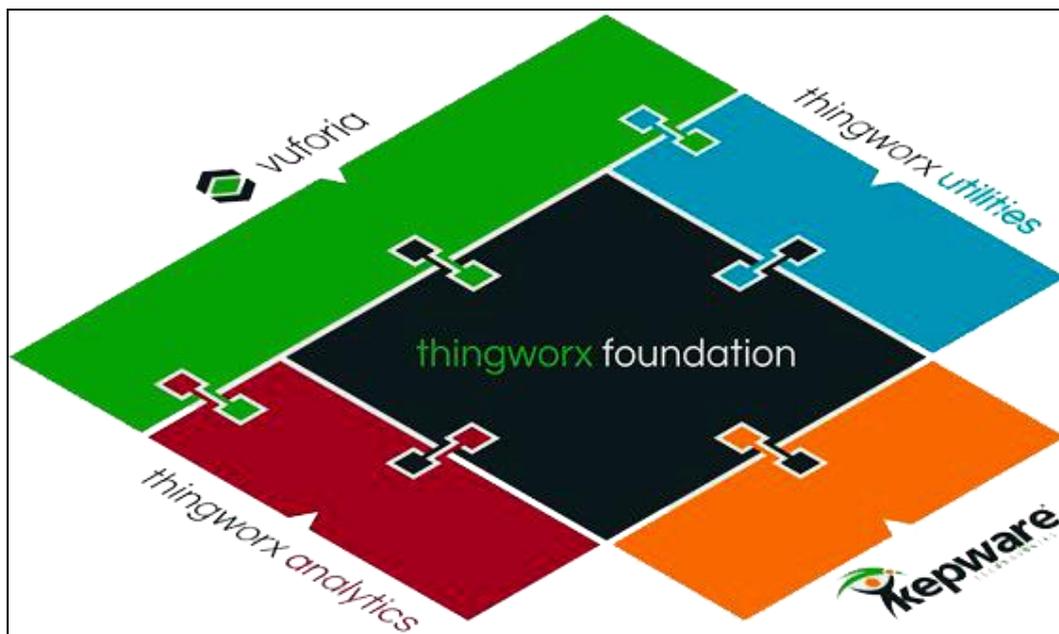


Рисунок 4.3 - Архітектура хмарної платформи ІоТ «ThingWorx Foundation»

Ядро платформи містить у собі базову складову – базу даних по інформаційній моделі тих виробничих процесів та "розумних" об'єктів, для яких виконується цифрова трансформація. Для зв'язку з контрольованими інтелектуальними об'єктами служить сервер «ThingWorx Connectivity», який також дозволяє у режимі реального часу виконувати будь-яку первинну обробку даних від підключених об'єктів та пристроїв. Також для спеціалізованої функціональності та розширення можливостей розробки на базі даної платформи слугує сервер «ThingWorx Utilities». Його використання дає можливість включати до складу платформи "розумного виробництва" такі прикладні задачі, як управління активами, управління ризиками, управління потоками задач та ролеве управління.

В компанії РТС за розвиток сервера «ThingWorx Connectivity» відповідає фірма-партнер «Kepware Technologies» [49-51], яка розробила та впровадила для цього свій програмний продукт - промислову комунікаційну платформу «KEPServerEX», що створює на окремому підприємстві чи виробничому об'єднанні єдине джерело цифрових даних промислової автоматизації для всіх користувальницьких додатків. Для цього комунікаційна платформа

«KEPServerEX» використовує OPC та протоколи інформаційних систем – SNMP, REST, ODBC, Web-протоколи. Так, OPC є провідним стандартом для комунікацій промислової автоматизації, що побудований за архітектурою "клієнт – сервер". «KEPServerEX» підтримує також перспективну специфікацію цього стандарту – OPC Unified Architecture (OPC UA), а також багато класичних його специфікацій – OPC Data Access (OPC DA), OPC Alarms and Events (OPC AE) та OPC Historical Data Access (OPC HDA).

Для обміну цифровими даними між комунікаційною платформою «KEPServerEX», розгорнутою в рамках локальної промислової системи автоматизації, та додатками користувача, реалізованими на «хмарній» платформі IoT, використовується спеціальний сервер «IoT Gateway» (рисунок 4.4). Він у реальному масштабі часу реалізує такий інформаційний обмін у формі безшовного потоку даних.

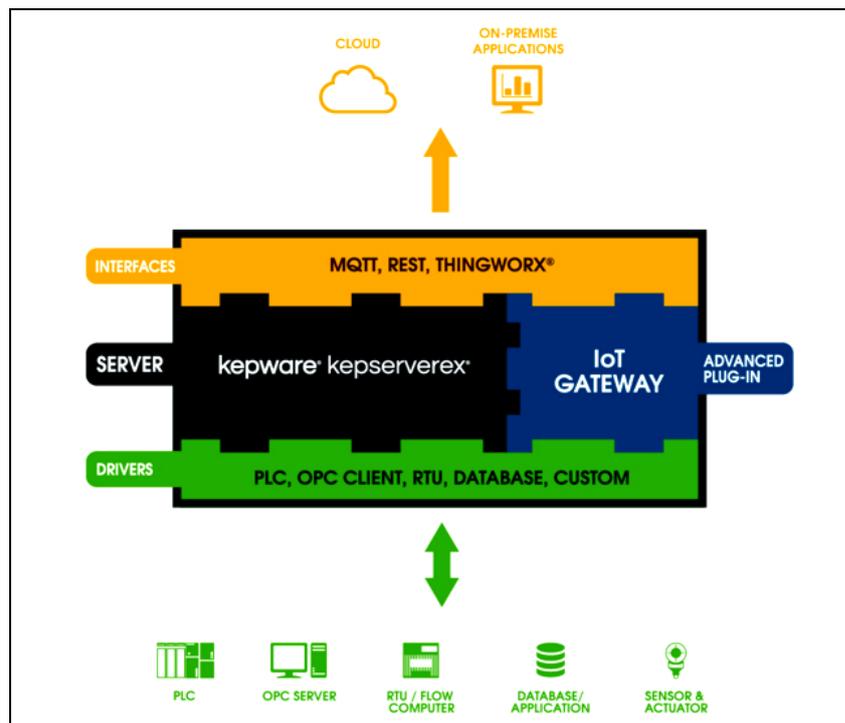


Рисунок 4.4 – Використання сервера «IoT Gateway» для передачі даних до «хмарних» додатків IoT

Крім того, сервер "IoT Gateway" включає в себе спеціальний програмний

агент «ThingWorx Agent» для максимально швидкої передачі промислових даних з технологічного рівня до «хмарної» платформи «ThingWorx Foundation» захищеним бінарним протоколом «ThingWorx AlwaysOn».

Для забезпечення обробки цифрових даних від різних інтелектуальних об'єктів та пристроїв локальної системи автоматизації в комунікаційній платформі «KEPServerEX» є такий інструмент як «Advanced Tags» (АТ) [51]. Наприклад, такі АТ для машино-машинної взаємодії (M2M) можуть додавати логічні та математичні функції у операційні зв'язки, або для системи управління виробництвом генерувати нові цифрові дані шляхом логічної та математичної обробки даних реального часу від інтелектуальних об'єктів та пристроїв.

Таким чином, використовуючи описаний вище функціонал «хмарної» платформи ІоТ «ThingWorx Foundation», можна розробити ескізний проєкт цифрової трансформації існуючого реального АТП допоміжного виробництва шляхом:

- його підключення через комунікаційну платформу «KEPServerEX» до спеціального програмного додатку, реалізованого на «хмарній» платформі «ThingWorx Foundation», для реалізації контролю його активів і розповсюдження цієї інформації через глобальну мережу;

- використання додаткової обробки цифрових даних у вбудованих тегах типу «Advanced Tags» (АТ) комунікаційної платформи «KEPServerEX» для реалізації машино-машинної взаємодії (M2M) автоматизованих виробничих ліній між собою та з АТП промислового складу, здійснювану без участі людини-оператора, що в цілому покращить якість та швидкість процесу управління допоміжним виробничим процесом.

На рисунку 4.5 та в додатку Б наведений проєкт такої цифрової трансформації архітектури програмного забезпечення АТП для І4.0. Архітектурна модель складається з таких вузлів:

- "Computer #1" (АРМ оператора допоміжного виробництва);
- "Controller #1" (ПЛК автоматизованої виробничої лінії №1);
- "Controller #2" (ПЛК автоматизованої виробничої лінії №2);

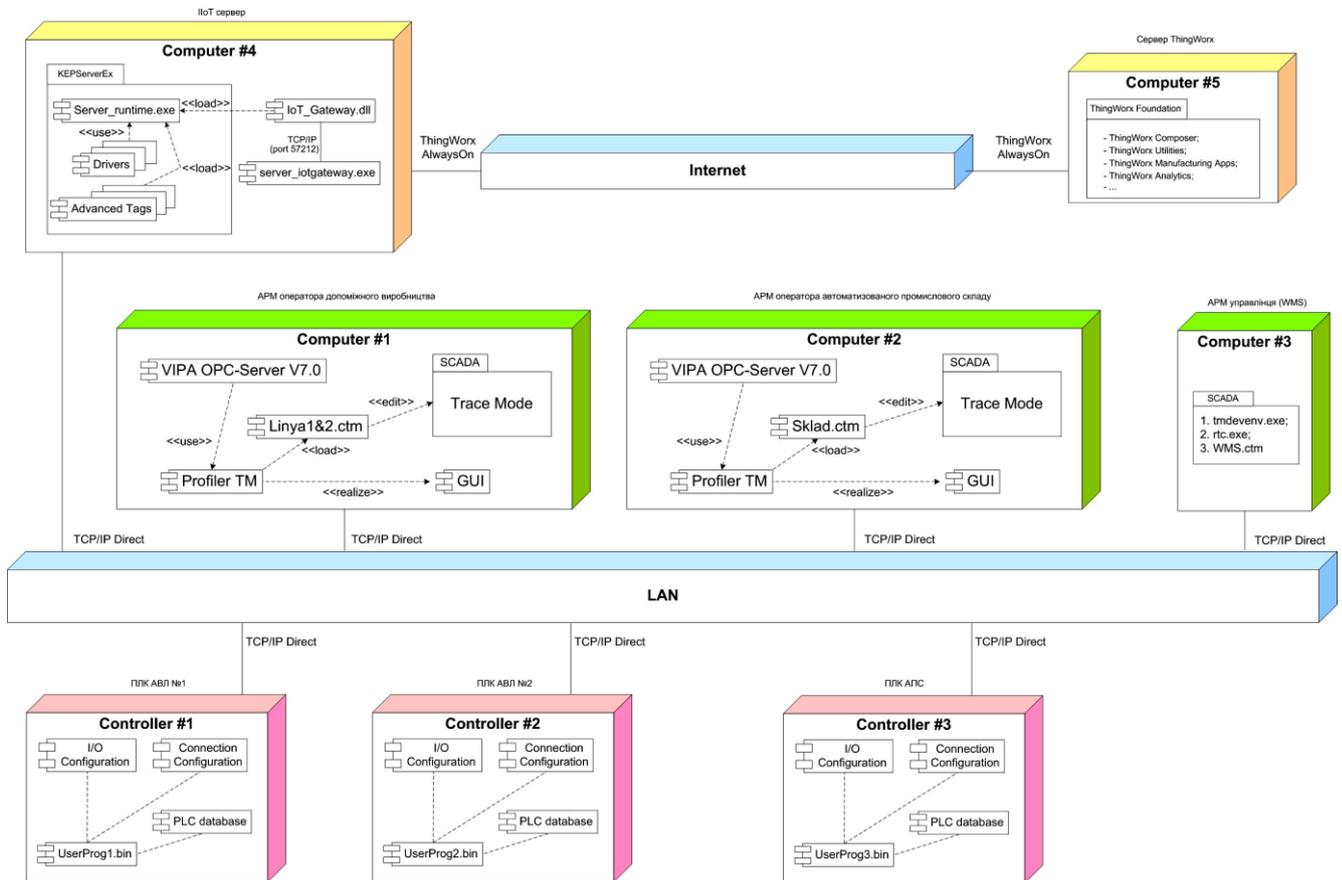


Рисунок 4.5 - Проект цифрової трансформації архітектури ПЗ

- "Computer #2" (APM оператора автоматизованого промислового складу);
- "Controller #3" (ПЛК автоматизованого промислового складу);
- "Computer #4" (APM управління з функцією WMS – управління логістичними процесами промислового складу);
- "Computer #5" (локальний сервер ІСУ виробництвом, ІоТ сервер);
- "Computer #6" («хмарний» сервер «ThingWorx» компанії РТС);
- "LAN" (обчислювальні засоби локальної мережі підприємства);
- "Internet" (обчислювальні засоби глобальної мережі Internet)..

Вузли "Controller #1", "Controller #2" та "Computer #1", а також "Computer #2" і "Controller #3", зв'язані між собою асоціацією "TCP/IP Direct". Ця асоціація моделює обмін даними між контролерами та відповідними ПК операторів через мережу LAN за протоколом TCP/IP Direct в режимі м'якого реального часу.

На вузлі "Computer #1" розгорнутий інструментальний пакет "SCADA".

Він моделює інтегроване середовище розробки та виконання прикладної програми "Linya1&2.ctm" АРМ оператора допоміжного виробництва, наприклад SCADA "Trace Mode 6".

Пакет "SCADA" дозволяє розробити та відредагувати файл "Linya1&2.ctm" проєкту прикладної програми АРМ оператора допоміжного виробництва. Ця програма завантажується до виконавчого середовища SCADA, наприклад для «Trace Mode 6» це буде «Profiler ТМ», яке і виконує прикладну програму в режимі м'якого реального часу (МРЧ). При виконанні прикладної програми "Linya1&2.ctm" виконавче середовище "Profiler ТМ" використовує два OPC-сервера "VIPA OPC-Server V7.0" для обміну даними з відповідними вузлами "Controller #1" та "Controller #2", а також реалізує графічний інтерфейс оператора (програмний компонент "GUI").

До вузла "Controller #1" завантажується файл прикладної програми "UserProg1.bin" для управління автоматизованою виробничою лінією №1 допоміжного виробництва. Цей файл також встановлює в цьому ПЛК настройки його області введення/виведення (програмний компонент "I/O Configuration") та інтерфейсу зв'язку TCP/IP Direct (програмний компонент "Connection Configuration"). При виконанні прикладної програми "UserProg1.bin" в ПЛК буде формуватися база даних "PLC database", яка містить інформацію про входні та вихідні фізичні сигнали, що обробляє прикладна програма.

До вузла "Controller #2" завантажується файл прикладної програми "UserProg2.bin" для управління автоматизованою виробничою лінією №2 допоміжного виробництва. Цей файл також встановлює в цьому ПЛК настройки його області введення/виведення (програмний компонент "I/O Configuration") та інтерфейсу зв'язку TCP/IP Direct (програмний компонент "Connection Configuration"). При виконанні прикладної програми "UserProg2.bin" в ПЛК буде формуватися база даних "PLC database", яка містить інформацію про входні та вихідні фізичні сигнали, що обробляє прикладна програма.

За аналогічним принципом розгорнуто програмне забезпечення у парі вузлів "Computer #2 - "Controller #3". У вузлі "Computer #2" (АРМ оператора автоматизованого промислового складу) виконується прикладна програма

"Sklad.ctm" управління ТП промислового складу, а у вузлі "Controller #3" – прикладна програма "UserProg3.bin".

На вузлі "Computer #3" (АРМ управління) розгорнутий інструментальний пакет "SCADA", який моделює інтегроване середовище розробки та виконання прикладної програми "WMS.ctm" (управління логістикою виробничого складу), наприклад SCADA "Trace Mode 6". Програма "WMS.ctm" вузла "Computer #3" через локальну мережу LAN взаємодіє з прикладною програмою "Sklad.ctm" (управління ТП промислового складу) вузла "Computer #2", що забезпечує горизонтальну інтеграцію двох систем управління.

На вузлі "Computer #4" (ІоТ сервер) встановлена програма сервера комунікаційної платформи "KEPServerEx", виконавче середовище якого "Server\_runtime.exe" застосовує вбудовані драйвери " Drivers" для доступу до джерел даних системи управління (ПЛК, SCADA), а також набір тегів типу «Advanced Tags» для реалізації машино-машинних взаємодій в системі управління допоміжним виробництвом.

Для зв'язування даних ІоТ сервера з «хмірними» сервісами платформи «ThingWorx Foundation» на вузлі "Computer #4" встановлений програмний компонент «IoT Gateway», який складається з плагіну сервера «IoT\_Gateway.dll» та ІоТ агента «server\_iotgateway.exe». Плагін сервера «IoT\_Gateway.dll» відповідає за конфігурування агентів протоколів MQTT, ThingWorx AlwaysOn, REST client та REST server, за збирання даних з виконавчого середовища «Server\_runtime.exe» та за конфігурування налаштувань програмного компонента «IoT Gateway». ІоТ агент «server\_iotgateway.exe» (системний сервіс) керує з'єднаннями з «хмарними» сервісами промислового Інтернету речей, зберігає у буфері дані, зібрані з плагіну сервера «IoT\_Gateway.dll», та забезпечує рівень авторизації та шифрування для кожного агента.

На вузлі "Computer #5", який є «хмарним» сервером компанії РТС, розгорнута платформа промислового Інтернету речей (ІоТ) «ThingWorx Foundation», в якій для реалізації контролю активів допоміжного виробництва, а також деяких складних функцій машино-машинної взаємодії, можуть бути використані такі компоненти: «ThingWorx Composer», «ThingWorx Utilities»,

«ThingWorx Analytics» , «ThingWorx Manufacturing Apps» та інші. Дані до цих сервісів передаються через мережу Internet за оригінальним протоколом «ThingWorx AlwaysOn» компанії PTC.

Спроекуємо тепер машино-машинні взаємодії (M2M) в рамках цифрової трансформації існуючого реального АТП допоміжного виробництва. Спочатку визначимось з їх загальним переліком, а потім перейдемо до розгляду тих засобів їх реалізації, які надає платформа «ThingWorx Foundation». На рисунку 4.6 схематично показаний існуючий допоміжний виробничий процес.

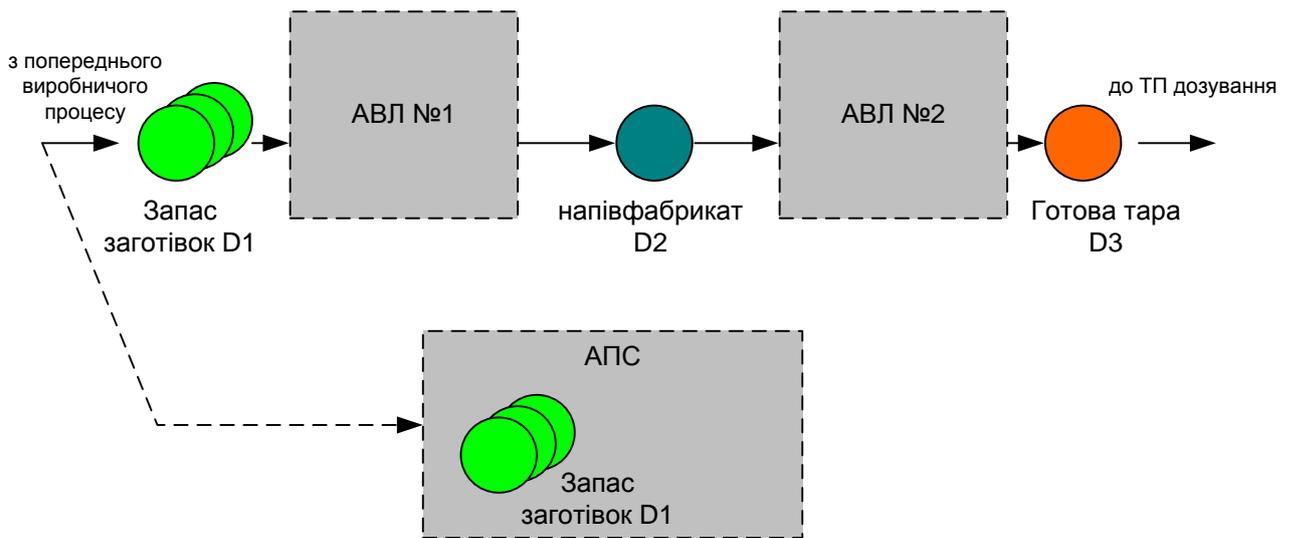


Рисунок 4.6 – Схема існуючого допоміжного виробничого процесу

Загальний виробничий процес забезпечується трьома виробничими системами – АВЛ №1 (автоматизована виробнича лінія №1), АВЛ №2 (автоматизована виробнича лінія №2) та АПС (автоматизований промисловий склад, АПС). На вхід цього виробничого процесу поступають заготовки D1 з попереднього виробничого процесу, наприклад з розкрою листового металу, створюючи на його вході певний їх запас. Виробнича система АВЛ №1 обробляє по чергові ці вхідні заготовки і виробляє з них напівфабрикати D2, які з'являються на виході даної виробничої системи. Далі напівфабрикати D2 подаються на вхід наступної виробничої системи АВЛ №2 допоміжного виробництва, після оброблення в якій ці напівфабрикати з'являються на виході системи у вигляді

готової тари D3 (пустих банок з кришками). Далі ця тара подається на вхід технологічного процесу дозування. З метою забезпечення ритмічної роботи описаного виробничого процесу на автоматизованому промисловому складі (АПС) обов'язково треба створювати запас заготовок D1 на випадок нештатних виробничих ситуацій, наприклад тимчасової зупинки роботи попереднього виробничого процесу з розкрою листового металу.

При штатному протіканні виробничого процесу середня продуктивність виробничої системи АВЛ №1 (PR1) повинна дорівнювати середній продуктивності виробничої системи АВЛ №2 (PR2). Тоді між цими системами не буде створюватися зайвий запас напівфабрикатів D2. Також на вході системи АВЛ №1 завжди повинна знаходитись хоча б одна заготовка D1 (зайві деталі можуть направлятися до АПС), а на виході системи АВЛ №2 не повинні накопичуватися зайва готова тара D3.

Проте за різних причин можуть виникати порушення штатного протікання описаного виробничого процесу, наприклад:

- зниження продуктивності попереднього виробничого процесу або повна його зупинка;
- аварійна зупинка виробничої системи АВЛ №1 (вихід з ладу або одного верстату, або обох верстатів, або робота);
- аварійна зупинка АВЛ №2 (вихід з ладу конвеєра або всіх трьох верстатів) або зменшення продуктивності цієї системи (вихід з ладу одного або двох верстатів);
- зміна продуктивності однієї з систем (АВЛ №1, АВЛ №2) або обох разом (зміна технології обробки, або перехід на нові типи тари, або заміна матеріалу тари, або застосування у верстатах інших інструментів і т.д.);
- виникнення необхідності примусової зупинки однієї з виробничих систем (АВЛ №1, АВЛ №2) для профілактичного ремонту чи обслуговування за рекомендацією аналітичної системи верхнього рівня, реалізованої на сервісах платформи «ThingWorx Foundation».

У разі виникнення саме таких нештатних ситуацій, згідно до вимог

концепції «розумного» підприємства "Індустрія 4.0", автоматизовані виробничі системи повинні самостійно (без участі операторів) активізувати між собою відповідні M2M взаємодії для вирішення виробничих проблем, що виникають. Саме такі M2M взаємодії і можна впровадити у існуючий реальний АТП в рамках його цифрової трансформації.

На рисунку 4.7 жирними пунктирними стрілками показана більшість M2M взаємодій, які повинні бути реалізованими у трансформованому АТП у разі виникнення тієї чи іншої нештатної ситуації, що описані вище.

У разі зниження продуктивності або повної зупинку попереднього виробничого процесу на вході виробничої системи АВЛ №1 може виникнути дефіцит заготівок D1, тому ця система повинна через взаємодію M2M.3 сповістити про це систему промислового складу АПС, яка, в свою чергу, повинна зі своїх запасів почати видавати на вхід АВЛ №1 потрібний запас заготівок D1.

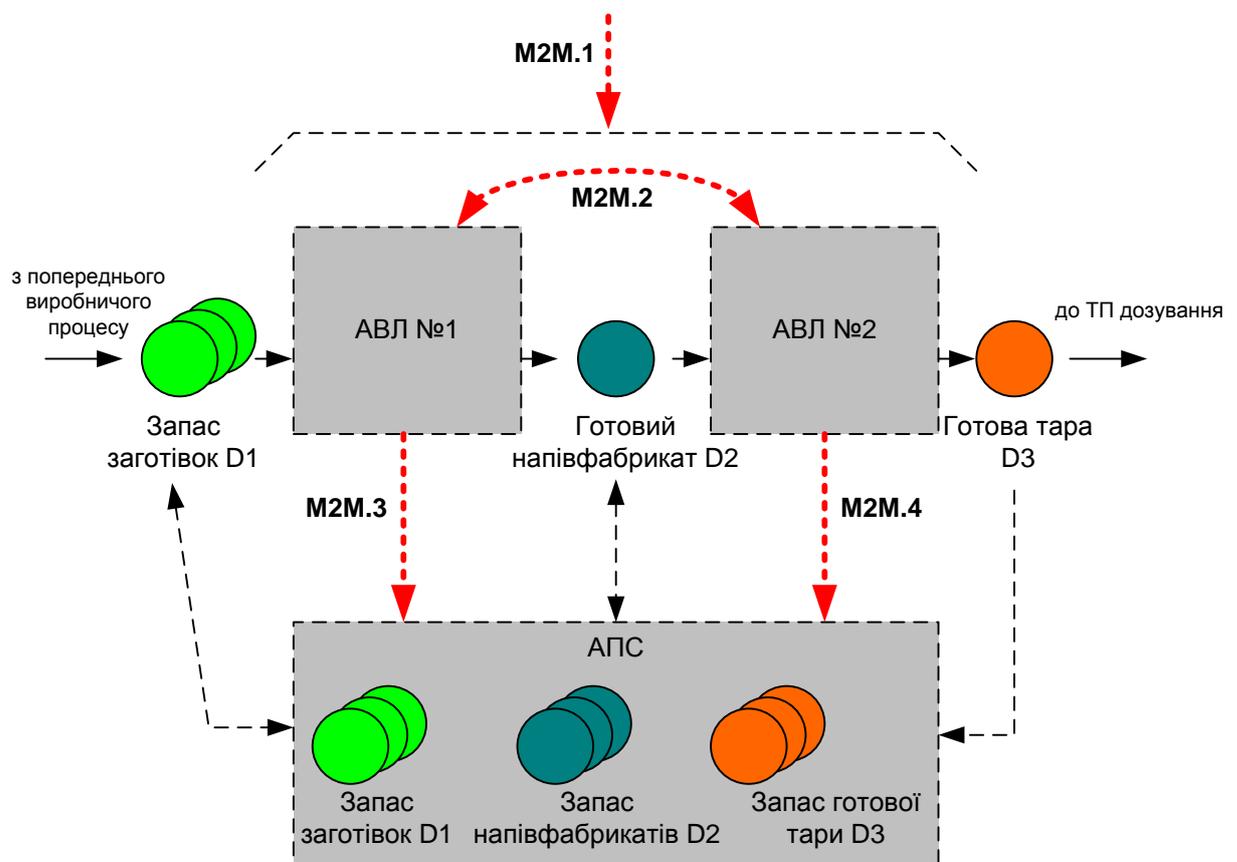


Рисунок 4.7 – Організація M2M взаємодій у випадку нештатних ситуацій

У разі аварійної зупинки виробничої системи АВЛ №1 може виникнути дефіцит напівфабрикатів D2 на вході виробничої системи АВЛ №2, тому система АВЛ №1 повинна через взаємодію M2M.3 сповістити про аварію систему промислового складу АПС, яка, в свою чергу, повинна зі своїх запасів почати видавати на вхід АВЛ №2 потрібний запас напівфабрикатів D2.

У разі аварійної зупинки виробничої системи АВЛ №2 на виході системи АВЛ №1 буде створюватися запас готових напівфабрикатів D2, який постійно зростатиме, тому система АВЛ №2 повинна через взаємодію M2M.4 сповістити про аварію систему промислового складу АПС, яка, в свою чергу, повинна почати приймати на склад напівфабрикати D2 з виходу АВЛ №1, збільшуючи у себе їх запас.

У разі аварійної зупинки наступного технологічного процесу дозування на виході системи АВЛ №2 створюється запас готової тари D3, який постійно зростатиме, тому система АВЛ №2 повинна через взаємодію M2M.4 сповістити про це систему промислового складу АПС, яка, у свою чергу, повинна почати приймати на збереження готову тару D3 з виходу АВЛ №2, створюючи в себе їх аварійний запас.

У разі порушення рівноваги між середньою продуктивністю виробничої системи АВЛ №1 та виробничої системи АВЛ №2 обидві системи повинні, по-перше, сповістити про це систему промислового складу АПС через взаємодії M2M.3 та M2M.4, а, по-друге, сповістити одна одну через взаємодію M2M.2. В результаті цих взаємодій системи можуть почати виконувати такі дії: або виробничі системи АВЛ №1 та АВЛ №2 корегують свою продуктивність при активній M2M.2 (та, що працює продуктивніше, зменшує швидкість роботи), або промисловий склад приймає на збереження зайві напівфабрикати D2 з виходу системи АВЛ №1 при активній M2M.3 (якщо АВЛ №1 працює продуктивніше ніж АВЛ №2), або промисловий склад відпускає зі своїх запасів напівфабрикати D2 на вхід системи АВЛ №2 при активній M2M.4 (якщо АВЛ №2 працює продуктивніше ніж АВЛ №1).

У разі появи рекомендацій від аналітичної системи верхнього рівня (через M2M.1) про необхідність примусової зупинки для профілактичного ремонту чи

обслуговування однієї з систем АВЛ №1 чи АВЛ №2 решта систем повинна виконувати ті дії, які вже описані вище для випадку таких аварійних зупинок.

Тепер розглянемо реалізацію описаних вище М2М взаємодій засобами платформи «ThingWorx Foundation». Як зазначалось вище, для підтримки М2М взаємодій у платформі «ThingWorx Foundation» передбачено використання тегів типу "Advanced Tags" (АТ) комунікаційної платформи «KEPServerEX». Теги цього типу дають можливість наповнювати М2М взаємодії логічними та математичними функціями для операційних зв'язків та виконання аналізу даних. Один АТ може зв'язати два теги даних, організувати тригер, що враховує логічні стани, та розрахувати нове значення за вихідними результатами вимірювань. Завдяки тому, що математична, логічна обробка даних та їх аналіз виконуються на рівні комунікаційної платформи, це наближає дані до їх джерел.

За допомогою шести типів "Advanced Tags" комунікаційної платформи «KEPServerEX» користувачі можуть значно покращити рішення своїх додатків промислової автоматизації. Пропонуються такі типи АТ:

- "Average Tag": розраховує середнє значення тегу за визначений період часу;
- "Complex Tag": групує багато тегів з різними типами даних у єдину комплексну сутність або структуру;
- "Link Tag": зв'язує дані, отримані за різними протоколами;
- "Maximum Tag": читає та зберігає на визначений час максимальне значення тегу;
- "Minimum Tag": читає та зберігає на визначений час мінімальне значення тегу;
- "Derived Tag": використовує головний сценарій та стандартні логічні та математичні функції для виконання обчислень над визначеними тегами; є можливість управляти частотою та умовами обрахунку функцій, а користувачі мають змогу вставляти більш складні функції у свої додатки.

Для реалізації описаних вище М2М взаємодій доцільно застосувати такі типи АТ, як "Average Tag" та "Derived Tag". На рисунку 4.8 показаний загальний

принцип побудови довільних M2M взаємодій на основі АТ.

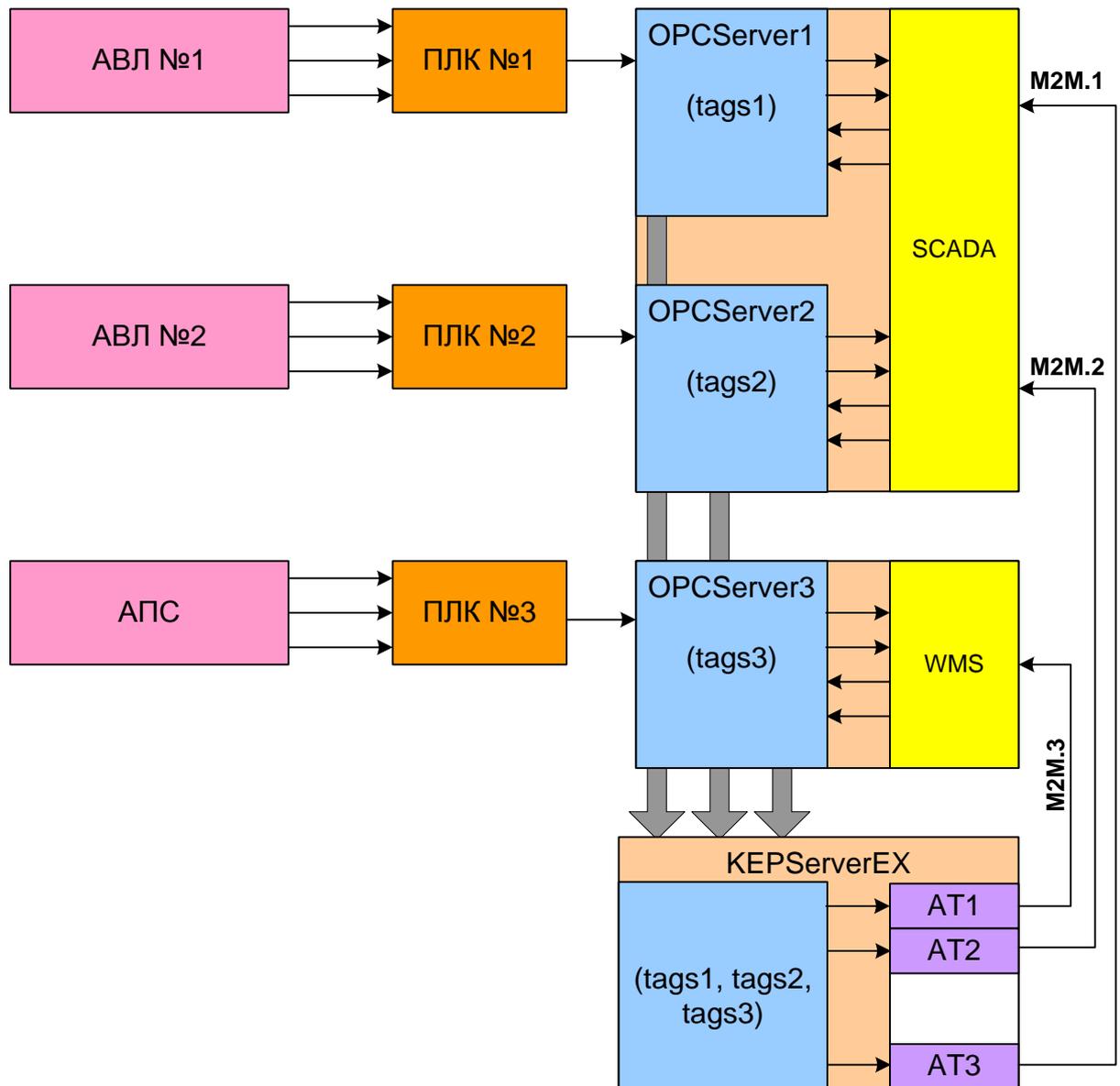


Рисунок 4.8 – Реалізація M2M взаємодій за допомогою "Advanced Tags"

Різноманітні вихідні електричні сигнали з автоматизованої виробничої лінії №1 (ABЛ №1)) та з автоматизованої виробничої лінії №2 (ABЛ №2), а також з автоматизованого промислового складу (АПС), вводяться до відповідного промислового контролера ПЛК №1 – ПЛК №3, а потім передаються в цифровій формі до значень тегів (tags1, tags2, tags3) відповідних OPC-серверів (OPCServer1, OPCServer2, OPCServer3). Також до тегів цих OPC-серверів вписують дані і прикладні програми АРМ оператора та управлінця – SCADA і WMS.

Комунікаційна платформа KEPServerEX створює сервер промислового Інтернету речей, теги якого читають дані з відповідних тегів трьох OPC-серверів (OPCServer1, OPCServer2, OPCServer3). Крім цих тегів в даному сервері створюються теги типу "Advanced Tags" (AT1, AT2, AT3 і т.д.), які в якості вхідних значень використовують вихідні значення звичайних тегів сервера (tags1, tags2, tags3). Кожний з "Advanced Tags" реалізує певну обробку вхідних даних, яку задає користувач. В результаті на виході кожного такого тегу формується вихідне значення, яке відповідає потрібному характеру M2M взаємодії. Вихідні значення тегів AT1 – AT3 зчитуються відповідними OPC-клієнтами (SCADA, WMS), які виступають в якості кінцевих точок окремих M2M взаємодій (M2M.1 – M2M.3).

Спроекуємо тепер усі визначені вище M2M взаємодії (див. рисунок 4.7).

Так на рисунку 4.9 показана спроектована архітектура взаємодії M2M.3, яка має діяти між виробничою системою АВЛ №1 та системою промислового складу АПС.

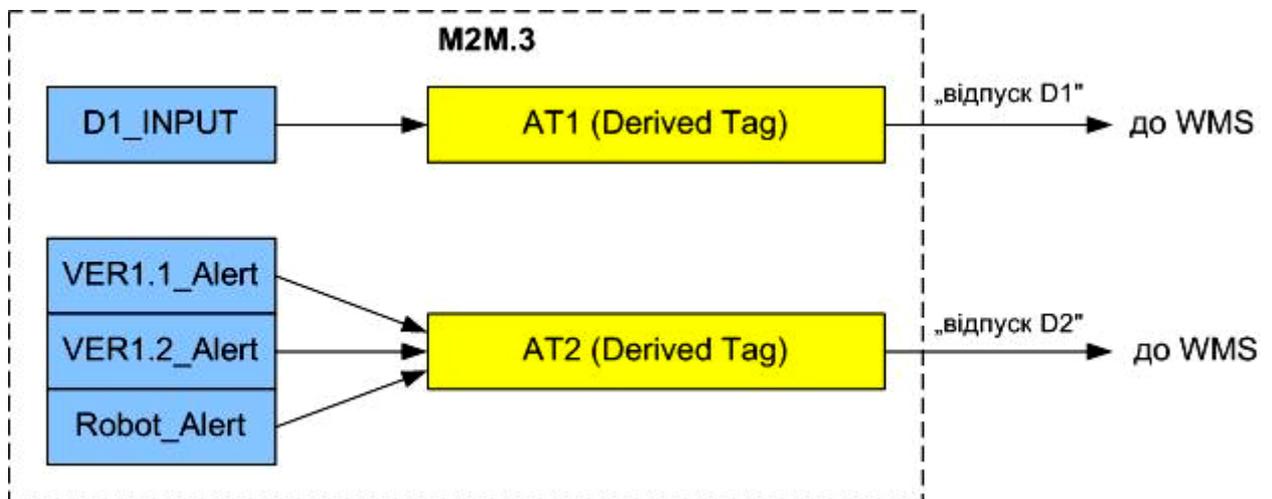


Рисунок 4.9 – Архітектура M2M взаємодії "M2M.3"

В цій групі створено два "Advanced Tags" типу "Derived Tag" (AT1, AT2). Перший обробляє тег "D1\_INPUT" (наявність заготовки D1 на вході АВЛ №1) з папки "Connectivity" сервера і формує наказ до системи WMS почати відпускати заготовки D1 на вхід АВЛ №1. Другий тег AT2 обробляє три теги аварійного стану

обладнання системи АВЛ №1 ("VER1.1\_Alert" – аварія верстату №1, "VER1.2\_Alert" – аварія верстату №2, "Robot\_Alert" – аварія робота) і формує на виході наказ до системи WMS почати відпускати напівфабрикати D2 на вхід АВЛ №2.

На рисунку 4.10 показана спроектована архітектура взаємодії M2M.4, яка має діяти між виробничою системою АВЛ №2 та системою промислового складу АПС. В цій групі створено два "Advanced Tags" типу "Derived Tag" (AT3, AT4). Перший тег AT3 обробляє чотири теги аварійного стану обладнання системи АВЛ №2 ("VER2.1\_Alert" – аварія верстату №1, "VER2.2\_Alert" – аварія верстату №2, "VER2.3\_Alert" – аварія верстату №3, "Convey\_Alert" – аварія конвеєра) і формує на виході наказ до системи WMS почати приймати напівфабрикати D2 з виходу АВЛ №1. Другий тег AT4 обробляє тег "D3\_OUTPUT" (наявність готової тари D3 на виході АВЛ №2) з папки "Connectivity" сервера і формує наказ до системи WMS почати приймати готову тару D3 з виходу АВЛ №2, бо наступний виробничий процес зупинився.

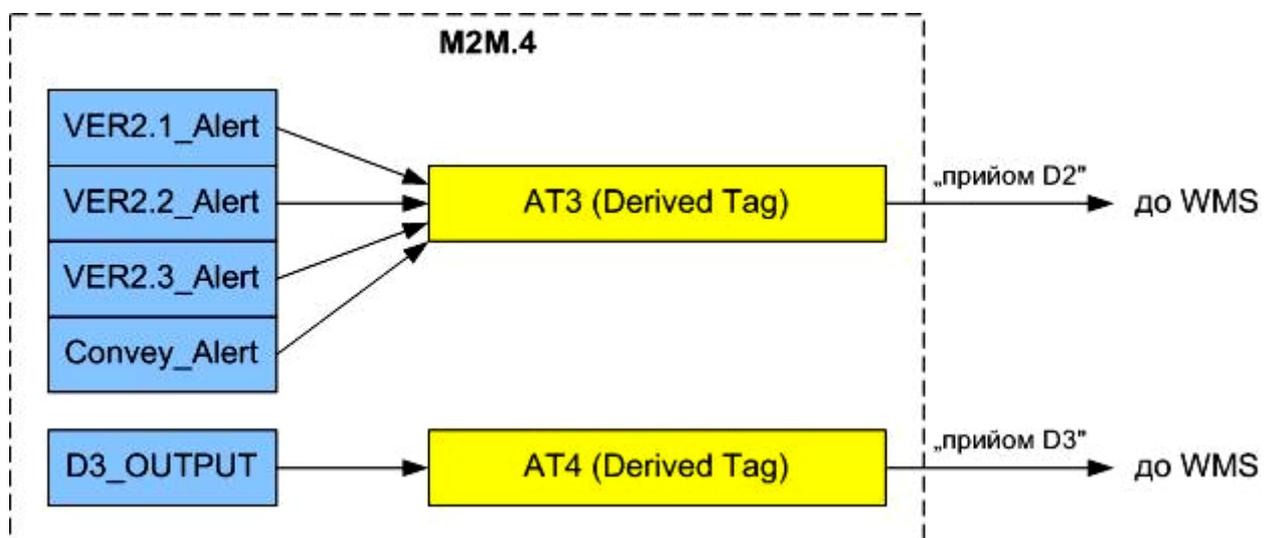


Рисунок 4.10 – Архітектура M2M взаємодії "M2M.4"

На рисунку 4.11 показана спроектована архітектура взаємодії M2M.2, яка має діяти між виробничими системами АВЛ №1 та АВЛ №2.

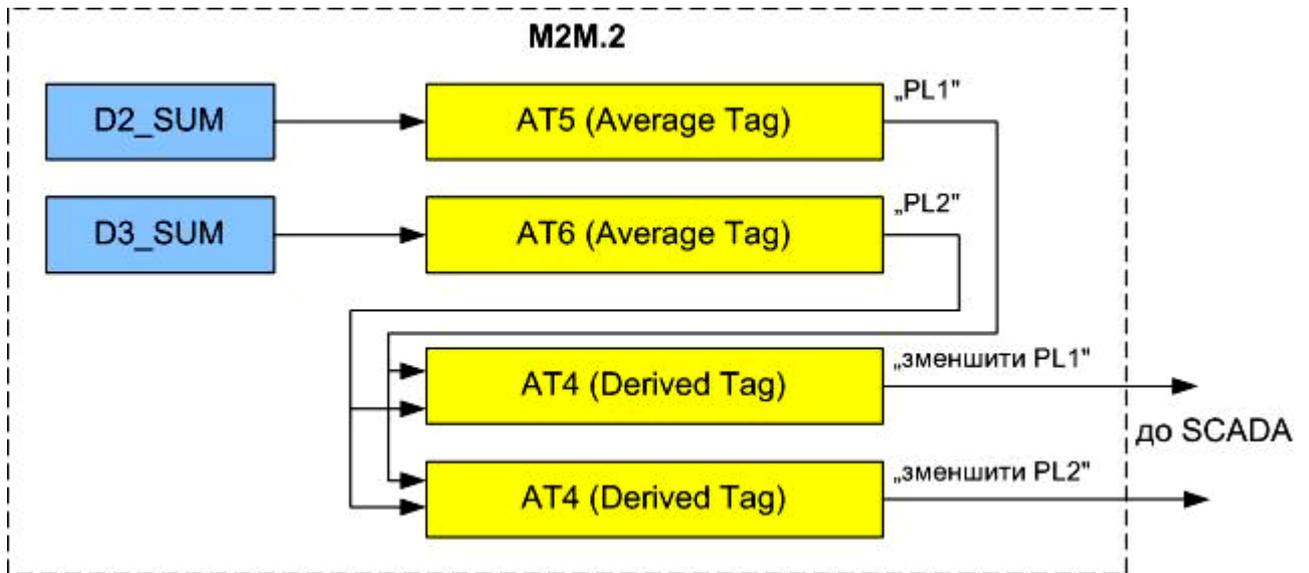


Рисунок 4.1 – Архітектура M2M взаємодії "M2M.2"

В цій групі створено два "Advanced Tags" типу "Average Tag" (AT5, AT6) та два теги типу "Derived Tag" (AT7, AT8). Перший тег AT5 обробляє тег "D2\_SUM" з папки "Connectivity" сервера (кількість напівфабрикатів D2, виготовлених виробничою системою АВЛ №1) і розраховує на виході середнє значення продуктивності системи АВЛ №1 „PL1" за визначений час. Другий тег AT6 обробляє тег "D3\_SUM" з папки "Connectivity" сервера (кількість одиниць готової тари D3, виготовлених виробничою системою АВЛ №2) і розраховує на виході середнє значення продуктивності системи АВЛ №2 „PL2" за визначений час. Третій тег AT7 порівнює два розрахованих значення продуктивності „PL1" та „PL2" і, якщо перша більше другої, то надає наказ до SCADA зменшити швидкість роботи системи АВЛ №1. почати приймати напівфабрикати D2 з виходу АВЛ №1. Четвертий тег AT8 також порівнює два розрахованих значення продуктивності „PL1" та „PL2" і, якщо друга більше першої, то надає наказ до SCADA зменшити швидкість роботи системи АВЛ №2.

На рисунку 4.12 показана спроектована архітектура взаємодії M2M.1, яка має діяти між усім виробничим процесом (АВЛ №1, АВЛ №2, АПС) та аналітичною системою верхнього рівня, що реалізована на основі сервісів платформи ThingWorx. Для цієї взаємодії не потрібно створювати "Advanced

Tags", а треба застосовувати плагін "KEPServerEX GateWay" для публікації через Інтернет тегів серверу «KEPServerEX» у інструментальному середовищі розробки "Thingworx Composer", що працює на відділеному сервері компанії РТС.

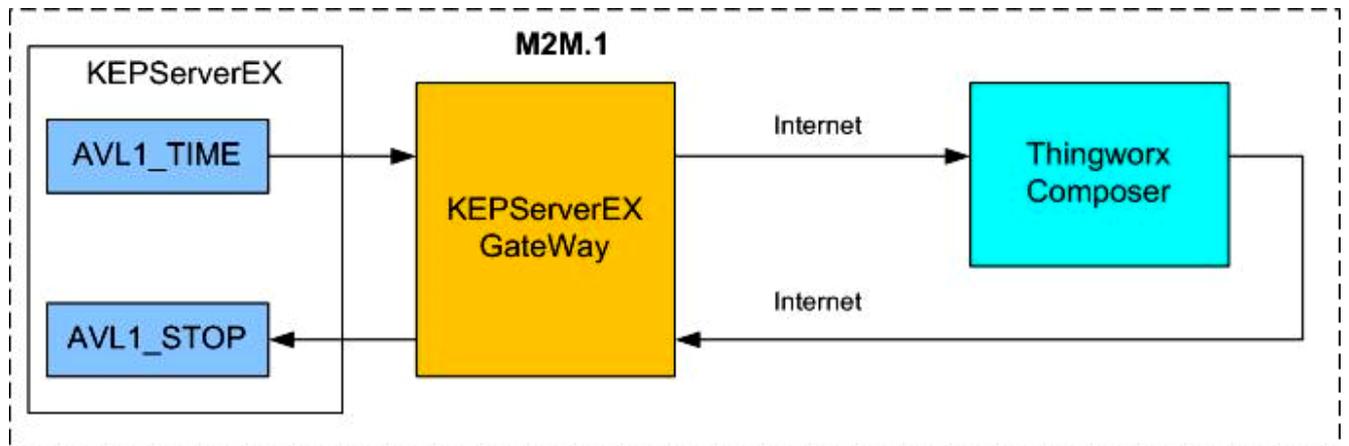


Рисунок 4.12 - Архітектура M2M взаємодії "M2M.1"

На рисунку показано, як можна реалізувати таку M2M взаємодію для формування рекомендації на зупинку виробничої системи АВЛ №1 для профілактичного ремонту чи обслуговування. Для цього тег "AVL1\_TIME" сервера KEPServerEX (загальний час роботи системи АВЛ №1) через плагін "KEPServerEX GateWay" передається до моделі Інтернет речі "AVL#1", створеній у інструментальному середовищі "Thingworx Composer". Після опрацювання цих даних відповідним аналітичним модулем буде сформована рекомендація щодо необхідності зупинки системи АВЛ №1. Ця рекомендація у вигляді змінної "AVL1\_STOP" передається через Інтернет до "KEPServerEX GateWay", а далі записується у відповідний тег сервера «KEPServerEX». Цей тег можна буде використовувати для зміни роботи виробничої системи через взаємодію M2M.3, як це було описано вище. Аналогічно можна організувати взаємодію M2M.1 для аналізу тривалості та зупинки системи АВЛ №2.

На цьому можна вважати, що ескізний проєкт початкової стадії цифрової трансформації АТП допоміжного виробництва виконаний у достатньому обсязі і може служити далі в якості відправної точки для виконання технічного проєкту.

#### 4.4 Концепція поглибленої цифрової трансформації АТП

Розглянемо тепер приклад проєктування більш поглибленої цифрової трансформації існуючого реального АТП допоміжного виробництва. Почнемо з розробки її концепції. Як було зазначено в розділі 3, існуючий реальний АТП для стадії використання (Usage) життєвого циклу та у порівнянні з властивістю/ознакою I4.0 «Абсолютна гнучкість виробничих процесів» має такий суттєвий недолік, що при необхідності зміни типу тари, в яку наливається готова продукція, треба буде знову розробляти інструменти та оснастку всіх верстатів, щоб вони могли виготовляти як напівфабрикати, так і саму тару нового типу, проте, якщо зміна типу напівфабрикатів та самої тари буде кардинальною, то може статися, що взагалі для даних верстатів неможливо буде створити відповідний інструмент та оснастку, що поставить питання або про придбання нових верстатів, або взагалі про відмову від запланованого оновлення типу тари. У певній мірі цей недолік є і наслідком того, що на стадії проєктування АТП допоміжного виробництва не використовуються цифрові моделі його компонентів, а це не дає змоги виконувати попереднє імітаційне моделювання технологічних операцій, виконуваних наявними верстатами при виготовленні нових типів напівфабрикатів та тари.

Як було описано вище, на існуючому реальному допоміжному виробництві використовуються дві автоматизовані виробничі лінії, які отримують різні рецепти від інтегрованої системи управління (ІСУ) на виготовлення партії комплектів тари одного з двох типів (банки та кришки до них). Для забезпечення даного технологічного процесу вихідними матеріалами на виробничому складі має створюватися необхідний їх запас. Після закінчення процесу виготовлення партії комплектів тари заданого типу, ця готова продукція у вигляді окремого матеріального потоку, реалізованого окремим промисловим конвеєром, переміщується або на виробничий склад для створення там потрібних запасів пустої тари даного типу, або на наступний технологічний процес дозування, де зразу використовується для розливу готової хімічної рідини.

В ході розробки нової концепції побудови АТП даного допоміжного

виробництва можна, наприклад, проаналізувати існуючі приклади цифрової трансформації аналогічних виробничих процесів, які передбачають впровадження ідей адитивного виробництва на основі промислових 3D-принтерів [9, 10,52-54]. Як правило, 3D-друк на цих виробництвах зазвичай не замінює лиття або інші класичні процеси, а переважно допомагає вирішувати специфічні виробничі задачі, які нездійсненні або занадто трудомісткі при використанні традиційних технологій механічної обробки. Такими задачами можуть бути такі:

- виготовлення унікальних деталей складної геометрії, у тому числі дрібних деталей, виробів із внутрішніми порожнинами й каналами, з тонкими стінками й т.п.;

- зниження загальної ваги виробів при збереженні їх завданих механічних властивостей;

- скорочення числа одиниць у складанні, коли кілька вихідних складальних одиниць друкуються разом, як єдине ціле, тобто вже у зібраному стані;

- створення різноманітних ніздрюватих структур зі збереженням усіх потрібних механічних властивостей;

- виготовлення форм для лиття під тиском на етапі підготовки виробництва, які потім застосовуються у технологічних процесах на етапі виробництва;

- швидке створення прототипів деталей та виробів по їх цифрових 3D-моделях на етапі проектування (дизайну), при цьому ці деталі та вироби на етапі подальшого виробництва виготовляються вже традиційними технологічними методами;

- швидке створення прототипів готової продукції на етапі проектування (дизайну) з метою оцінки її зовнішньої привабливості, зручності використання або виконання узгодження її геометричних параметрів з характеристиками та функціональними можливостями встановленого технологічного обладнання.

Зміст наведених виробничих задач адитивного виробництва на основі 3D-принтерів та проведений вище аналіз загальної схеми існуючого реального АТП

дозволяє зробити висновок, що використання 3D-принтера в рамках даного виробничого процесу допоможе вирішити багато корисних задач, наприклад:

- виготовлення деталей для ремонту технологічного обладнання, встановленого на даному промисловому підприємстві;
- виготовлення прототипів нової продукції, наприклад, пустої тари покращеного дизайну для розливу готової хімічної рідини;
- виготовлення прототипів нової оснастки для технологічного обладнання для випуску нових видів продукції;
- виготовлення форм для лиття під тиском елементів готової продукції або нових деталей оснастки технологічного обладнання.

Для прикладу розглянемо концепцію реалізації в ході цифрової трансформації існуючого реального АТП допоміжного виробництва кількох з цих практичних задач (рисунок 4.13).

По-перше, можна поставити задачу замінити існуючу пусту тару для хімічної рідини на новий її тип, який буде мати більш сучасний дизайн. Тоді на

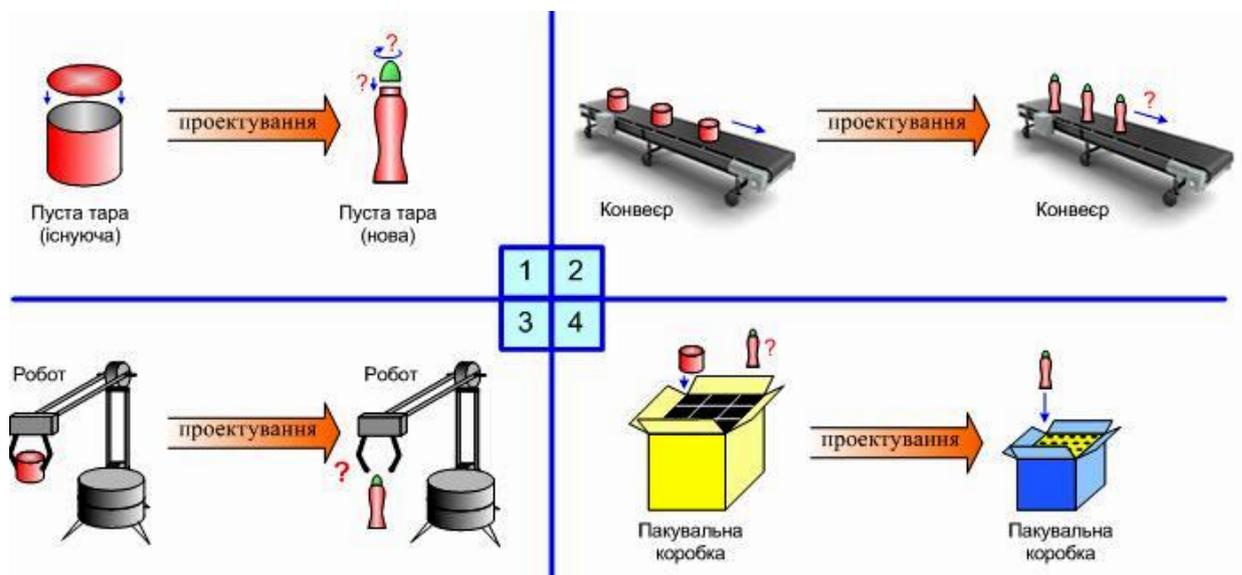


Рисунок 4.13 – Варіанти практичних задач цифрової трансформації реального АТП допоміжного виробництва

стадії проєктування виробничого процесу («Development») треба спроектувати

цей новий тип тари, використовуючи відповідний програмний інструмент 3D-моделювання, щоб ця тара була не тільки зручна для користувача продукції, але і була максимально пристосованою для процесу її виготовлення на існуючому технологічному обладнанні (задача №1 на рисунку 4.13). На рисунку показана не тільки нова форма тари у вигляді пляшки, яка має замінити існуючу на виробництві традиційну металеву банку, але і те, що разом з новим типом тари виникає необхідність пошуку і інших проєктних рішень, наприклад, способу, як ця нова тара за допомогою технологічного обладнання буде щільно закриватися зверху кришкою – або міцно закручуватися, або закорковуватися зверху з фіксацією кришки.

По-друге, на існуючому АТП допоміжного виробництва матеріальні потоки організовані у вигляді конвеєрів, за допомогою яких різні матеріальні ресурси переміщуються як всередині даного АТП, так і ззовні між іншими АТП. Зокрема, заповнені хімічною рідиною банки переміщуються від АТП дозування до АТП пакування готової продукції, де вони пакувальним роботом знімаються з конвеєра і поміщуються у картонні коробки. Але якщо буде впроваджений новий тип тари, то виникне необхідність проєктування і нової оснастки для конвеєра, яка буде забезпечувати надійне (без падіння) переміщення конвеєром заповнених хімічною рідиною нових пляшок без зменшення швидкості його руху, а краще і з її збільшенням (задача №2 на рисунку 4.13).

По-третє, при автоматичному пакуванні готової продукції у коробки на існуючому реальному АТП пакування застосовується спеціальний промисловий робот, який за допомогою комп'ютерного зору визначає наявність одиниці готової продукції на вхідному конвеєрі (банка одного з двох типів, що наповнена хімічною рідиною та закрита зверху кришкою), знімає її зі стрічки конвеєра і переносить у вільну комірку пакувальної коробки. Якщо ж впроваджувати новий тип тари у вигляді, наприклад, пляшки, то виникне необхідність проєктування і нової оснастки для пакувального робота, яка дозволить йому надійно захоплювати цю заповнену рідиною пляшку і переносити її у комірку пакувальної коробки (задача №3 на рисунку 4.13).

По-четверте, пакування готової продукції на існуючому реальному АТП

пакування, як зазначено вище, виконується спеціальним пакувальним роботом у картонні коробки відповідної конструкції. Якщо ж треба буде впроваджувати новий тип тари, наприклад, у вигляді пляшок, то виникне необхідність проектування і нової конструкції пакувальної коробки, габаритні розміри та внутрішня комірчаста структура якої будуть сумісні з розмірам та формою нової тари (задача №4 на рисунку 4.13).

На рисунку 4.14 показаний весь комплекс дослідницьких задач, виконуваних студентами при розробці концепції поглибленої цифрової трансформації існуючого реального АТП допоміжного виробництва на основі адитивного виробництва з 3D-принтером.



Рисунок 4.14 – Комплекс дослідницьких задач для поглибленої цифрової трансформації реального АТП

Як видно з рисунку, від час практичних або лабораторних занять застосовується спеціальне віртуальне інструментальне середовище, яке містить не тільки засоби 3D-моделювання нового типу тари, пакувальної коробки та

оснастки технологічного обладнання, але і засоби симуляції виробничих процесів, на яких студенти за допомогою цифрових моделей технологічного обладнання та технічної анімації можуть наочно перевірити правильність взаємодії нової оснастки обладнання з новою тарою та новою пакувальною коробкою. Після того, як перевірка дасть позитивний результат, цифрові дані 3D-моделей передаються на 3D-принтер, який створює відповідні фізичні прототипи. За їх допомогою студенти зможуть на практиці перевірити їх реальну взаємодію між собою, а у разі виявлення помилок, знову повернутися до процесу їх проектування. Це і є ціллю дослідження концептуального рішення поглибленої цифрової трансформації існуючого реального АТП допоміжного виробництва, що можуть виконувати студенти за допомогою нових НЗ.

#### **4.5 Висновки до розділу**

В результаті виконання дослідницьких та проектних робіт у даному розділі магістерської кваліфікаційної роботи була обґрунтована модель діяльностей заключної стадії навчального дослідження цифрової трансформації АТП допоміжного виробництва, які виконують студент і викладач. На основі запропонованого методу онтологічного дослідження предметної області промислової автоматизації І4.0 була побудована її концептуальна модель та означені способи її використання для цифрової трансформації АТП допоміжного виробництва. В якості прикладів результатів, які студенти можуть отримати в ході навчального дослідження, був розроблений ескізний проєкт початкової цифрової трансформації даного АТП , а також концепція його поглибленої цифрової трансформації.

## 5. ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 5.1 Технологічний аудит розробленого комп'ютеризованого навчального засобу

Як було зазначено раніше, для підвищення якості підготовки фахівців в області автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки на кафедрі АІТ ВНТУ були уведені до навчального плану нові професійно-орієнтовані дисципліни – «Кіберфізичні системи автоматизації виробництва» та «Промисловий Інтернет речей», які повинні надати здобувачам основні теоретичні відомості та практичні знання щодо цифрової трансформації існуючого комп'ютерно-інтегрованого виробництва у «розумне» цифрове виробництво, що функціонує за концепцією «Індустрія 4.0».

У зв'язку з цим, метою магістерської кваліфікаційної роботи стала розробка комп'ютеризованого навчального засобу для дослідження практичних методів цифрової трансформації виробництва в рамках концепції «Індустрія 4.0».

Для досягнення поставленої мети було вивчено існуючі підходи до реалізації інформаційно-освітнього середовища типу «віртуальне виробництво»; досліджено методи і засоби цифрової трансформації сучасного підприємства у перспективне «розумне» цифрове підприємство; зроблено техніко-економічне обґрунтування концептуального рішення комп'ютеризованого навчального засобу, розроблено його технічне забезпечення та здійснено практичну реалізацію комп'ютеризованого навчального засобу.

Для встановлення комерційного потенціалу розробленого нами комп'ютеризованого навчального засобу було запрошено 3-х відомих експертів: к.т.н., професора Кривогубченка С.Г., к.т.н. доцента Овчинникова К.В. та к.т.н., доцента Кулика Я.А.

Технологічний аудит на предмет комерційного використання розробленого нами комп'ютеризованого навчального засобу було зроблено за критеріями, які наведено в таблиці 5.1

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу будь-якої розробки і їх бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає

Продовження таблиці 5.1

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
0	1	2	3	4	
<b>Практична здійсненність</b>					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витрачати значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Запрошені експерти оцінили комерційний потенціал розробленого нами комп'ютеризованого навчального засобу шляхом виставлення бальних оцінок по кожному із критеріїв, як це пропонується в таблиці 5.1.

Виставлені експертами бальні оцінки було зведено в таблицю 5.2.

Після проведеного експертного оцінювання нами було розраховано рівень комерційного потенціалу розробленого нами комп'ютеризованого навчального засобу. Для цього були використані рекомендації, які наведено в таблиці 5.3 [1].

Таблиця 5.2 – Результати оцінювання комерційного потенціалу наукової розробки (за 5-ти бальною шкалою оцінювання: 0 -1 – 2 – 3 - 4)

Критерії	Ініціали, прізвище експертів		
	С.Г. Кривогубченко	С.Г. Овчинников	Я.А.Кулик
	Бали, що їх виставили експерти:		
1	3	3	3
2	4	4	4
3	3	4	4
4	3	4	4
5	4	3	3
6	3	4	4
7	4	4	4
8	3	4	4
9	3	3	3
10	4	3	3
11	4	4	4
12	3	3	4
Сума балів	СБ <sub>1</sub> = 41	СБ <sub>2</sub> = 43	СБ <sub>3</sub> = 44
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{41+43+44}{3} = \frac{128}{3} \approx 43,67$		

Таблиця 5.3 – Рівні комерційного потенціалу будь-якої наукової розробки

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$ , розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 48	Високий

Оскільки середньоарифметична сума балів, що їх виставили експерти, становить 43,67 балів (із максимально можливих 48-ми балів), то це свідчить, що розроблений нами комп'ютеризований навчальний засіб має рівень комерційного потенціалу, який можна вважати як «високий».

Це обумовлено тим, що на відміну від існуючих комп'ютеризованих навчальних засобів, новий засіб будується на основі інформаційно-освітнього середовища типу «віртуальне виробництво», що дозволяє за рахунок використання наявних інструментальних середовищ та додаткового реального 3D-принтера суттєво підвищувати ефективність практичної підготовки здобувачів шляхом виконання навчального проєкту цифрової трансформації допоміжного «віртуального виробництва» у адитивне виробництво на основі 3D-принтера.

А практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що їх можна легко застосувати при створенні аналогічних навчальних засобів для підготовки фахівців споріднених галузей знань та спеціальностей.

## **5.2 Розрахунок витрат на розроблення комп'ютеризованого навчального засобу**

Основна заробітна плата  $Z_o$  розробників, консультантів, фахівців тощо, величина якої визначається за формулою:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ [грн]}, \quad (5.1)$$

де  $M$  – місячний посадовий оклад розробника (дослідника), грн;

Для 2025 року приймемо, що:

$M$  дорівнює (8000...35000) грн/місяць;

$T_p$  – число робочих днів в місяці; приймемо  $T_p$  дорівнює 22 дні;

$t$  – число днів роботи розробників, дослідників, інших фахівців.

Зроблені розрахунки величини основної заробітної плати розробників, дослідників, консультантів тощо зведемо до таблиці 5.4:

Таблиця 5.4 – Основна заробітна плата розробників (дослідників)

Найменування посади виконавця	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів (годин) роботи	Витрати на оплату праці, грн
1. Науковий керівник магістерської роботи, професор	28000	1272,73	20 годин	$(1272,73 / 6) \times 20 = 4242,43 \approx 4243$ грн (при 6-годинному робочому дні)
2. Здобувач-магістрант (виконавець)	8000	363,64	78 днів	28363,92 $\approx$ 28364 грн
3. Консультант з економічної частини	22000	1000,00	1,5 години	$(1000,00 / 6) \times 1,5 = 249,99 \approx 250$ грн (при 6-годинному робочому дні)
Загалом				$Z_o = 32857$ грн

Додаткова заробітна плата  $Z_d$  розробників (дослідників) тощо, яка розраховується як (10...12)% від величини їх основної заробітної плати, тобто:

$$Z_d = \alpha \cdot Z_o = (0,1...0,12) \cdot Z_o \text{ [грн]} \quad (5.2)$$

Прийmemo, що  $\alpha$  дорівнює 0,114. Тоді для нашого випадку отримаємо:

$$Z_d = 0,114 \times 32857 = 3745,70 \approx 3746 \text{ (грн)}.$$

Нарахування на заробітну плату НЗП<sub>зп</sub> розробників (дослідників) та всіх інших фахівців розраховуються за формулою:

$$\text{НЗП}_{зп} = (Z_o + Z_d) \cdot \frac{\beta}{100}, \text{ [грн]} \quad (5.3)$$

де  $\beta$  – ставка обов'язкового єдиного внеску на державне соціальне страхування, %. В 2025 році ставка  $\beta = 22\%$ . Тоді:

$$НЗН_{зп} = (32857 + 3746) \times 0,22 = 8052,66 \approx 8053 \text{ (грн)}.$$

Амортизація основних засобів А, які використовувались під час виконання магістерської кваліфікаційної роботи:

$$A = \frac{Ц \cdot Н_a}{100} \cdot \frac{T}{12} [\text{грн}], \quad (5.4)$$

де Ц – загальна балансова вартість основних засобів, грн;

Н<sub>а</sub> – річна норма амортизаційних відрахувань.

Встановлено, що Н<sub>а</sub> дорівнює (2,5...25)%;

T – термін використання основних засобів, місяці.

Зроблені розрахунки зведено в таблицю 5.5.

Таблиця 5.5 – Розрахунок амортизаційних відрахувань

Найменування обладнання, приміщень тощо	Балансова вартість, грн	Норма амортизації, %	Термін використання, місяців	Величина амортизаційних відрахувань, грн
1. Комп'ютерна техніка, обладнання, інші спеціальні прилади тощо	112000	20,5	3,0 (при 75% використанні)	4305
2. Приміщення університету, факультету, кафедри	100600	3,5	3,0 (при 60% використанні)	528,15 ≈ 529
Всього				A = 4834 грн

Витрати на матеріали М розраховуються за формулою:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot Ц_i \cdot K_i - \sum_1^n B_i \cdot Ц_b [\text{грн}], \quad (5.5)$$

де Н<sub>і</sub> – витрати матеріалу і-го найменування, кг;

Ц<sub>і</sub> – вартість матеріалу і-го найменування;

$K_i$  – коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i$  дорівнює (1,1...1,15);

$V_i$  – маса відходів матеріалу  $i$ -го найменування;

$C_v$  – ціна відходів матеріалу  $i$ -го найменування;

$n$  – кількість видів матеріалів.

Витрати на комплектуючі  $K$  розраховуються за формулою:

$$K = \sum_1^n N_i \cdot C_i \cdot K_i \text{ [грн]}, \quad (5.6)$$

де  $N_i$  – кількість комплектуючих  $i$ -го виду, шт.;  $C_i$  – ціна комплектуючих  $i$ -го виду;  
 $K_i$  – коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i$  дорівнює (1,1...1,15);  $n$  – кількість видів комплектуючих.

Під час виконання магістерської кваліфікаційної роботи загальні витрати на матеріали та комплектуючі 1500 грн.

Витрати на силову електроенергію  $V_e$  розраховуються за формулою:

$$V_e = \frac{V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d}, \text{ [грн]} \quad (5.7)$$

де  $V$  – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2025 р.  $V$  приблизно дорівнює 8,0 грн/кВт;

$\Pi$  – установлена потужність обладнання, кВт;  $\Pi$  дорівнює 1,1 кВт;

$\Phi$  – фактична кількість годин роботи обладнання, годин.

Прийmemo, що  $\Phi$  дорівнює 250 годин;

$K_{\Pi}$  – коефіцієнт використання потужності;  $K_{\Pi}$  менше ніж 1 дорівнює 0,80.

$K_d$  – коефіцієнт корисної дії,  $K_d$  дорівнює 0,64.

Тоді витрати на силову електроенергію будуть дорівнювати:

$$V_e = \frac{V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d} = \frac{8,0 \cdot 1,1 \cdot 250 \cdot 0,80}{0,64} = 2750,00 \text{ (грн)}.$$

Інші витрати  $V_{\text{інш}}$  можна прийняти як (50...300)% від основної заробітної плати розробників, тобто:

$$V_{\text{інш}} = (0,5 \dots 3) \times Z_o. [\text{грн}] \quad (5.8)$$

Для нашого випадку отримаємо:

$$V_{\text{інш}} = 0,75 \times 32857 = 24642,75 \approx 24643 \text{ (грн)}.$$

Сума всіх попередніх статей витрат становить витрати на виконання цієї магістерської кваліфікаційної роботи безпосередньо розробником-магістрантом – В.

$$B = 32857 + 3746 + 8053 + 4834 + 1500 + 2750 + 24643 = 78383 \text{ (грн)}.$$

Загальні витрати на розроблення комп'ютеризованого навчального засобу становитимуть:

$$B_{\text{заг}} = \frac{B}{\beta}, [\text{грн}] \quad (5.9)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання цієї роботи.

Оскільки наша розробка на цей момент часу практично готова, то можна умовно прийняти, що,  $\beta$  приблизно дорівнює 0,95 [55]. Тоді:

$$B_{\text{заг}} = \frac{78383}{0,95} = 82508,42 \text{ (грн)}.$$

Тобто прогнозовані загальні витрати на розроблення нами комп'ютеризованого навчального засобу можуть становити приблизно 83 тисячі грн.

### 5.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації розробки

Проведене дослідження ринку показало, що розроблений нами комп'ютери-зований навчальний засіб знайде широке застосування на ринку освітянських послуг завдяки своїм кращим функціональним і вартісним характеристикам. Приблизний аналіз місткості ринку показав, що на сьогодні в Україні кількість реальних користувачів подібних стендів може становити приблизно 700 зацікавлених осіб. Окрім того, можна очікувати зростання попиту на нашу розробку принаймні протягом 3-х років після її впровадження.

Тобто, якщо наша розробка буде впроваджена з 1 січня 2026 року, то її результати будуть виявлятися протягом 2026-го, 2027-го та 2028-го років.

Прогноз зростання попиту на нашу розробку може складати по роках:

- а) 2026 р. – приблизно 50 осіб (відносно базового року);
- б) 2027 р. – 75 осіб (відносно базового року);
- в) 2028 р. – 100 осіб (відносно базового року).

Аналіз ринку також показує, що сьогодні приблизна ціна на подібні розробки становить 2500 грн. А оскільки розроблений нами комп'ютеризований навчальний засіб має значно кращі функціональні можливості, то його можна буде реалізовувати на ринку дещо дорожче, ніж подібні (та аналогічні розробки), наприклад, в середньому за 3,0 тисяч грн, тобто на 0,5 тисяч грн дорожче.

Тоді можливе збільшення чистого прибутку  $\Delta\Pi_i$ , що його може отримати потенційний інвестор від комерціалізації нашої розробки при її виведенні на ринок, становитиме:

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta\Pi_o \cdot N + \Pi_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right), \quad (5.10)$$

де  $\Delta\Pi_o$  – збільшення ціни реалізації розробки  $\Delta\Pi_o = 3,0 - 2,5 = + 0,5$  тисяч грн;

$N$  – обсяг діяльності у році до впровадження розробки;  $N = 700$  шт.;

$\Delta N$  – покращення основного кількісного показника від впровадження розробки:  
у 2026 році – 25 шт., у 2027 році 50 шт., у 2028 році 75 шт.;

$C_0$  – ціна реалізації розробленого нами комп'ютеризованого навчального засобу після його виведення на ринок,  $C_0 = 3,0$  тисячі грн;

$n$  – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки; для нашого випадку  $n = 3$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість;  $\lambda = 0,8333$ ;

$\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати  $\rho = (0,2 \dots 0,5)$ ; візьмемо рівень  $\rho = 0,5$ ;

$\nu$  – ставка податку на прибуток. У 2025 році  $\nu = 18\%$ .

Тоді можливе зростання чистого прибутку  $\Delta \Pi_1$  для потенційного інвестора протягом першого року від можливої комерціалізації нашої розробки (2026 р.) становитиме:

$$\Delta \Pi_1 = [0,5 \cdot 700 + 3,0 \cdot 50] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) = 170,82 \approx 171 \text{ (тисяч грн)}.$$

Можливе зростання чистого прибутку  $\Delta \Pi_2$  для потенційного інвестора від можливої комерціалізації нашої розробки протягом другого (2027 р.) року становитиме:

$$\Delta \Pi_2 = [0,5 \cdot 700 + 3,0 \cdot 75] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) = 196,45 \approx 197 \text{ (тисяч грн)}.$$

Можливе зростання чистого прибутку  $\Delta \Pi_3$  для потенційного інвестора від можливої комерціалізації нашої розробки протягом третього (2028 р.) року становитиме:

$$\Delta \Pi_3 = [0,5 \cdot 700 + 3,0 \cdot 100] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) = 222,07 \approx 223 \text{ (тисяч грн)}.$$

Приведена вартість зростання для потенційного інвестора всіх чистих прибутків від можливої комерціалізації нашої розробки становитиме:

$$\text{ПП} = \sum_1^t \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, [\text{грн}] \quad (5.11)$$

де  $\Delta\Pi_i$  – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої роботи, грн;

$t$  – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої роботи, роки. Для нашого випадку  $t$  дорівнює 3 роки;

$\tau$  – ставка дисконтування (рівень інфляції). Прийmemo, що  $\tau$  дорівнює 0,1 (10,0%);

$t$  – період часу (в роках) від моменту початку розробки комп'ютеризованого навчального засобу до моменту отримання потенційним інвестором можливих чистих прибутків від комерціалізації навчального засобу.

Тоді прогнозована приведена вартість зростання всіх можливих чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від комерціалізації нашої розробки, становитиме:

$$\text{ПП} = \frac{171}{(1+0,1)^2} + \frac{197}{(1+0,1)^3} + \frac{223}{(1+0,1)^4} \approx 142 + 148 + 153 = 443 \text{ (тисячі грн)}.$$

Теперішня вартість інвестицій PV (або можлива вартість придбання нашої розробки інвестором для її комерціалізації):

$$\text{PV} = K \times V_{\text{зар}} = (1,0 \dots 5,0) \times V_{\text{зар}}, [\text{грн.}], \quad (5.12)$$

де  $V_{\text{зар}} = 83$  тисяч грн (див. підрозділ 5.1).

Для нашого випадку прийmemo, що:

$$PV = (1,0 \dots 5,0) \times 83 = 1,0 \times 83 = 83 \text{ (тисячі грн).}$$

Абсолютний економічний ефект для інвестора від можливої комерціалізації нашої розробки за три роки (2026, 2027, 2028) складе:

$$E_{\text{абс}} = \text{ПП} - PV = 443 - 83 = 360 \text{ (тисяч грн).}$$

Далі розрахуємо внутрішню дохідність  $E_{\text{в}}$  вкладених інвестицій (коштів):

$$E_{\text{в}} = \sqrt[T_{\text{ж}}]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} - 1, [\%] \quad (5.13)$$

де  $E_{\text{абс}}$  – абсолютний ефект вкладених інвестицій;  $E_{\text{абс}} = 360$  тисяч грн;

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій  $PV = 83$  тисячі грн;

$T_{\text{ж}}$  – життєвий цикл розробки, роки.

$T_{\text{ж}} = 4$  роки (2025-й, 2026-й, 2027-й, 2028-й роки).

Для нашого випадку отримаємо:

$$E_{\text{в}} = \sqrt[4]{1 + \frac{360}{83}} - 1 = \sqrt[4]{1 + 4,3373} - 1 = \sqrt[4]{5,3373} - 1 = 1,5199 - 1 = 0,52 \approx 52,0\%.$$

Мінімальна дохідність вкладених коштів  $\tau_{\text{мін}}$ , нижче за яку потенційному інвестору не вигідно буде займатися комерціалізацією нашої розробки, визначається за формулою:

$$\tau_{\text{мін}} = d + f, [\%] \quad (5.14)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні  $d = (0,10 \dots 0,16)$ . Прийmemo, що  $\tau = 12\%$ .

$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладень;  $f = (0,05 \dots 0,30)$ .

Прийmemo, що  $f = 30\%$ , тобто  $f = 0,3$ .

Тоді для нашого випадку отримаємо:

$$\tau_{\text{мін}} = 0,12 + 0,30 = 0,42,$$

або  $\tau_{\text{мін}} = 42(\%)$ .

Оскільки величина  $E_B = 52,0\%$  більша  $\tau_{\text{мін}} = 42\%$ , то потенційний інвестор у принципі може бути зацікавлений у виведенні на ринок розробленого нами комп'ютеризованого навчального засобу.

Термін окупності коштів, вкладених у можливу комерціалізацію розробленого нами комп'ютеризованого навчального засобу, становитиме:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_B} = \frac{1}{0,52} \approx 1,93 \text{ (років)}, \quad (5.15)$$

тобто менше 3 років, що також свідчить про потенційну економічну доцільність комерціалізації розробленого нами комп'ютеризованого навчального засобу.

#### **5.4 Висновки до розділу**

Таким чином, основні техніко-економічні показники розробленого нами комп'ютеризованого навчального засобу, визначені у технічному завданні, повністю виконані.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання розділу 1 магістерської кваліфікаційної роботи був проведений огляд основних напрямків цифрової трансформації сучасного промислового виробництва, яка здійснюється з метою впровадження ідей четвертої промислової революції «Індустрія 4.0». Для подальшого обґрунтування загальної архітектури нового навчального засобу для практичного вивчення здобувачами процесу цифрової трансформації була досліджена існуюча в комп'ютеризованій навчальній лабораторії реалізація допоміжного виробництва в рамках «віртуального виробництва» уявної хімічної продукції. Досліджена предметна область цифрової трансформації аналогічних технологічних процесів, та намічені ті її напрями, які можуть досліджуватися на нових навчальних засобах. Розроблена загальна архітектура нового комп'ютеризованого навчального засобу, яка відображає і складові її частини, і основні стадії виконання досліджень.

В результаті виконання дослідницьких та проектних робіт у розділі 2 магістерської кваліфікаційної роботи була обґрунтована модель потоку робіт стадії «Моделювання існуючого автоматизованого ТП», який виконує і здобувач, і викладач, в ході дослідження цифрової трансформації допоміжного виробництва промислового підприємства. Зроблений огляд та наведені приклади основних комп'ютерних моделей, що має розробляти викладач для навчально-методичного забезпечення навчального практикуму. Зроблений огляд та наведені приклади комп'ютерних моделей, що має розробляти здобувач в ході цього ж навчального практикуму.

В подальшому на основі цих комп'ютерних моделей здобувач зможе якісно виконати наступну стадію цифрової трансформації існуючого в лабораторії ТП допоміжного виробництва.

В результаті виконання дослідницьких та проектних робіт у розділі 3 магістерської кваліфікаційної роботи було сформоване загальне бачення процесу виконання стадії «Аналіз реального автоматизованого ТП» при практичному

вивченні цифрової трансформації ТП допоміжного виробництва промислового підприємства. На основі цього бачення був розроблений деталізований алгоритм виконання робіт здобувачем та викладачем в рамках даної стадії навчального дослідження. Для пояснення практичного виконання такого алгоритму наведений приклад процесу виконання аналізу існуючого АТП та виявлення його недоліків у порівнянні з властивостями/ознаками «розумного виробництва» І4.0.

В результаті виконання дослідницьких та проектних робіт у розділі 4 магістерської кваліфікаційної роботи була обґрунтована модель діяльності заключної стадії навчального дослідження цифрової трансформації АТП допоміжного виробництва, які виконують здобувач і викладач. На основі запропонованого методу онтологічного дослідження предметної області промислової автоматизації І4.0 була побудована її концептуальна модель та означені способи її використання для цифрової трансформації АТП допоміжного виробництва. В якості прикладів результатів, які здобувачі можуть отримати в ході навчального дослідження, був розроблений ескізний проєкт початкової цифрової трансформації даного АТП, а також концепція його поглибленої цифрової трансформації.

В економічному розділі магістерської кваліфікаційної роботи доведена висока економічна ефективність можливого впровадження нового комп'ютеризованого навчального засобу у вузах України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лопухов І. Комунікаційні технології розумного підприємства у рамках концепції Індустрія 4.0 та Інтернету речей // Сучасні технології автоматизації. – 2017. - №2. – С. 36-44.

2. Папінов В.М. Багатофункціональна комп'ютеризована лабораторія для наскрізної практичної підготовки студентів спеціальності 151 / В.М. Папінов, Я.А. Кулик // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології/ Міжнародний науково-технічний журнал. – 2018. - №2(36). – С. 89-104.

3. Папінов В.М. Industrial Internet of Things: практичне вивчення на базі багатофункціональної комп'ютеризованої лабораторії / В.М. Папінов, Я.А. Кулик // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології/ Міжнародний науково-технічний журнал. – 2019. - №2(38). – С.122-137.

4. Папінов В.М. Автоматизований виробничий склад: гібридне моделювання в навчальній комп'ютеризованій лабораторії / В.М. Папінов // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології/ Міжнародний науково-технічний журнал. – 2020. - №1(39). – С.61-77 (<https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/download/571/545/632>).

5. Папінов В.М. Лабораторна імітація «навчальної фабрики»: гібридне моделювання матеріальних потоків / В.М. Папінов // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології/ Міжнародний науково-технічний журнал. – 2020. - №2(40). – С.65-81 (<https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/581>).

6. Як створити цифрове підприємство: 6 етапів на шляху до Індустрії 4.0 [Електронний ресурс] . URL : <https://www.tadviser.com/index.php>.

7. Лабораторна модель автоматизованої виробничої лінії з конвеєром (допоміжний технологічний процес №1) / Укладач: Папінов В.М. – Вінниця, ВНТУ, 2020. – 13 с.

8. Лабораторна модель автоматизованої виробничої лінії з роботом (допоміжний технологічний процес №2) / Укладач: Папінов В.М. – Вінниця, ВНТУ, 2020. – 11 с.

9. 3D-принтери сьогодні: Porsche інвестує у 3D-технології Intamsys [Електронний ресурс] . URL: <https://3dtoday.com/blogs/news3dtoday/porsche-investiruet-v-3d-texnologii-intamsys>.

10. 3D-друк металами: короткі відповіді великі питання, частина 1 [Електронний ресурс] . URL : <https://habr.com/post/587382/>.

11. Autodesk Fusion 360: Tutorial: Additive Manufacturing with Process Simulation and Post-Processing [Електронний ресурс] . URL : <https://youtu.be/XgtWsAiLs3Q>.

12. Fusion 360 Additive Manufacturing [Електронний ресурс] . URL : [https://youtu.be/tuBe\\_pbS4Cs](https://youtu.be/tuBe_pbS4Cs).

13. Industry 4.0: Design, 3D print & Robotic Integration of a Jig for custom end effector of Dobot arm [Електронний ресурс] . URL : <https://youtu.be/zRadTtgyzgw>.

14. Тимчук А.О. Комп'ютеризований навчальний засіб для практичного вивчення цифрової трансформації допоміжного виробництва на хімічному підприємстві / А.О. Тимчук, В. М. Папінов // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)» [Електронне мережне наукове видання] . URL : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/schedConf/presentations>.

15. Косов М. Індустрія освоює промисловий Інтернет речей // Сучасні технології автоматизації. – 2017. - №3. – С. 16-19.

16. Автоматизація процесів: навчальний курс [Електронний ресурс]. URL : <http://opiobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine/index.html>.

17. Автоматизація виробництва [Електронний ресурс]. URL : [http://opiobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine/4\\_\\_.html](http://opiobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine/4__.html).

18. Технологічний процес [Електронний ресурс]. URL : [http://opiobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine/3\\_\\_.html](http://opiobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine/3__.html).

19. Гур'янова А.В., Заколдаєв Д.А., Шукалова А.В., Жарінова І.О., Костишина М.О. Організація цифрових виробництв індустрії 4.0 на основі кіберфізичних систем та онтологій // Науково-технічний вісник інформаційних технологій, механіки та оптики. – 2018. – Т.18. – С. 268-277.

20. OVERVIEW OF DIGITAL TRANSFORMATION: MARKET SIZE, BENEFITS AND TRENDS [Електронний ресурс]. URL : <https://www.analyticsinsight.net/overview-of-digital-transformation-market-size-benefits-and-trends/>.

21. The evolution of digital transformation [Електронний ресурс]. URL : <https://www.analyticsinsight.net/the-evolution-of-digital-transformation/>.

22. Nathan Furr, Andrew Shipilov, Didier Rouillard, Antoine Hemon-Laurens. The 4 Pillars of Successful Digital Transformations [Електронний ресурс]. URL : <https://hbr.org/2022/01/the-4-pillars-of-successful-digital-transformations>.

23. Mohan Subramaniam. The 4 Tiers of Digital Transformation [Електронний ресурс]. URL : [https://hbr.org/2021/09/the-4-tiers-of-digital-transformation?ab=at\\_art\\_art\\_1x4\\_s02](https://hbr.org/2021/09/the-4-tiers-of-digital-transformation?ab=at_art_art_1x4_s02).

24. Digital Transformation in the Manufacturing Industry [Електронний ресурс]. URL : <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=U0FjPgF5ZsA>.

25. Черемних С.В., Семенов І.О., Ручкін В.С.. Моделювання та аналіз систем. IDEF-технології: практикум. - К.: Видавництво «НК», 2006. – 192 с.

26. Пупена О.М. Автоматизовані системи управління виробництвом (MES-рівень): курс лекцій для студ. освіт. ст. "магістр" спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" спеціалізації "Інтегровані автоматизовані системи управління" денної та заочної форм навчання / О.М. Пупена, Р.М. Міркевич. - К.: НУХТ, 2016. -135 с.

27. Пупена О.М. Принципи функціонування систем керування основним виробництвом через призму стандарту ІЕС-62264 / О.М. Пупена, О.М. Клименко, Р.М. Міркевич. – К.: НУХТ, 2019. – 49 с.

28. Implementing Industrie 4.0: This is how it works! [Електронний ресурс]: Festo Corporate. URL : <https://youtube/ZCLHojIj7eA>.

29. MBSE for Dummies: Rethinking your systems engineering approach [Електронний ресурс]. URL : <https://youtu.be/KR6bb8HRzzc>.

30. Папінов В.М. Організація віртуального виробництва в лабораторії 5303 [Електронний ресурс]. URL : [https://iq.vntu.edu.ua/b04213/html/nlr/nlr.php?card\\_id=41175&id=960&renum=1](https://iq.vntu.edu.ua/b04213/html/nlr/nlr.php?card_id=41175&id=960&renum=1).

31. Папінов В.М. Лабораторне завдання для роботи №4 на тему «Вивчення лабораторної імітації інтегрованої АСУ виробництвом» [Електронний ресурс]. URL : [https://iq.vntu.edu.ua/b04213/html/nlr/nlr.php?card\\_id=41175&id=960&renum=1](https://iq.vntu.edu.ua/b04213/html/nlr/nlr.php?card_id=41175&id=960&renum=1).

32. Visio: Працюйте з графічним представленням даних, де і коли вам потрібно [Електронний ресурс]. URL : <https://www.microsoft.com/uk-ua/microsoft-365/visio/flowchart-software>.

33. Batch Control. Part 1: Models and Terminology: ANSI/ISA-88.00.02-2001. - [Чинний від 2010-01-01]. – USA: International Society of Automation.

34. Are you ready for future of manufacturing?) [Електронний ресурс] / URL: [www.3ds.com](http://www.3ds.com) .

35. Індустрія 4.0: як скористатися новими технологіями // Сучасні технології автоматизації. – 2021. – №3. – С. 6-9.

36. Гур'янова А.В. та ін. Організація цифрових виробництв Індустрії 4.0 на основі кіберфізичних систем та онтологій / О.В. Гур'янова, Д.А. Заколдаєв, А.В. Шукалова, І.О. Жарінова, М.О. Костишина // Науково-технічний вісник інформаційних технологій, механіки та оптики. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 268 – 277.

37. Hwang G., Lee J., Park J., Chang T.-W. Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment // International Journal of Production Research. 2017. V. 55. N 9. P. 2590–2602. doi: 10.1080/00207543.2016.1245883.

38. Qu T., Thurer M., Wang J., Wang Z., Fu H., Li C. System dynamics analysis for an Internet-of-Things-enabled production logistics system // International Journal of Production Research. 2017. V. 55. N 9. P. 2622–2649. doi: 10.1080/00207543.2016.1173738.

39. Vogel-Heuser B., Rosch S., Fischer J., Simon Th., Ulewicz S., Folmer J. Fault handling in PLC-based Industry 4.0 automated production systems as a basis for restart and self-configuration and its evaluation // Journal of Software Engineering and Applications. 2016. V. 9. N 1. P. 1–43. doi: 10.4236/jsea.2016.91001.

40. Reference Models for Digital Manufacturing Platforms/ Francisco Fraile, Raquel Sanchis, Raul Poler, Angel Ortiz// MDPI: Appl. Sci. 2019, 9, 4433; doi:10.3390/app9204433 [Електронний ресурс]. URL : [www.mdpi.com/journal/applsci](http://www.mdpi.com/journal/applsci).
41. Peter Adolphs. RAMI 4.0: An architectural Model for Industrie 4.0/URL: [www.plattform-i40.de](http://www.plattform-i40.de).
42. Тривимірна еталонна архітектурна модель RAMI 4.0 / URL: [https://www.phoenixcontact.com/online/portal/ru?1dmy&urile=wcm:path:/ruru/web/offcontext/insite\\_landing\\_pages/1323f37f-e566-4009-8645-661c715cea23/6ddf5dfb-dbc47c8-8f1a-dc915d263cd3/605016fb-ed97-4b22-a6fb-de1f93556226/605016fb-ed97-4b22-a6fb-de1f93556226](https://www.phoenixcontact.com/online/portal/ru?1dmy&urile=wcm:path:/ruru/web/offcontext/insite_landing_pages/1323f37f-e566-4009-8645-661c715cea23/6ddf5dfb-dbc47c8-8f1a-dc915d263cd3/605016fb-ed97-4b22-a6fb-de1f93556226/605016fb-ed97-4b22-a6fb-de1f93556226).
43. Система управління життєвим циклом створює умови інвестиційної безпеки для виробників та користувачів / URL: <https://www.phoenixcontact.com>.
44. Пупена О. Огляд сучасних стандартів інтегрованого виробництва / О. Пупена, І. Ельперін, Р. Міркевич Є. // Автоматизація технологічних і бізнес - процесів. – 2016. – Т. 8. – №3. – С. 63-74.
45. Черняк Л. Кіберфізичні системи на старті [Електронний ресурс]: Відкриті системи. – 2014. - №2. URL: <https://www.osp.ru/os/2014/02/13040038/>.
46. Воскресенська М. AIOT для розумних фабрик / М. Воскресенська // Сучасні технології автоматизації. – 2022. - №2. – С. 16÷18.
47. Офіційний сайт компанії PTC [Електронний ресурс]. URL : <https://www.ptc.com/>.
48. Пирогов М.А. ThingWorx – платформа розробки ефективних рішень щодо цифрової трансформації сільського господарства [Електронний ресурс]. URL : <http://events.agbz.ru/>.
49. Офіційний сайт Kerware Technologies [Електронний ресурс]. URL : [www.kerware.com](http://www.kerware.com).
50. Industrial Connectivity [Електронний ресурс] : Kerware Technologies. URL : <https://www.kerware.com/products/kepserverex/>.

51. Advanced Tags [Електронний ресурс] : Kepware Technologies. URL : <https://www.kepware.com/products/kepserverex/advanced-plugins/advanced-tags>.

52. Лиття під тиском у прес-формах, надрукованих на 3D-принтері: технічне дослідження від лідера у сфері виробництва пластмас [Електронний ресурс]. URL : <https://3dtoday.com/blogs/igo3d-russia/lite-pod-davleniem-v-press-formax-napecatannyx-na-3d-printere-texniceskoe-issledovanie-ot-lidera-v-sfere-proizvodstva-plastmass-i-kompozii>.

53. 3D-принтери сьогодні: Чи потрібний 3D принтер компанії, що займається фрезерною та токарною обробкою? [Електронний ресурс]. URL : <https://3dtoday.com/blogs/1617db764a/nuzen-li-3d-printer-kompanii-zanimayushheisya-frezernoii-i-tokarnoi-obrabotkoi-opyt-prodmas-neva>.

54. Industry 4.0: Design, 3D print & Robotic Integration of a Jig for custom end effector of Dobot arm [Електронний ресурс]. URL: <https://youtu.be/zRadTtgyzgw>.

55. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. / Укладачі В.О. Козловський, О.Й. Лесько, В.В.Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

## **ДОДАТКИ**

**ДОДАТОК А**  
(обов'язковий)

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації  
Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри АІТ

Олег БІСІКАЛО

«17» 10 2025 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

на магістерську кваліфікаційну роботу

«Комп'ютеризований навчальний засіб для практичного вивчення цифрової  
трансформації допоміжного виробництва на хімічному підприємстві»

08-31.МКР.012.00.000 ТЗ

Керівник роботи:

Володимир ПАПІНОВ

«16» 10 2025 р.

Здобувач:

гр. 1АКІТР-24м

Андрій ТИМЧУК

«16» 10 2025 р.

Вінниця – 2025 рік

## **1 Назва і галузь застосування**

Комп'ютеризований навчальний засіб (КНЗ) для практичного вивчення цифрової трансформації допоміжного виробництва на хімічному підприємстві.

КНЗ будуть використовуватися як програмно-технічні засоби навчання при підготовці у вищому навчальному закладі фахівців зі спеціальності 174 - "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка".

## **2 Підстава для виконання роботи**

Робота виконується на підставі наказу по університету №\_\_\_ від \_\_\_\_\_.2025 р. та індивідуального завдання, складеного та затвердженого кафедрою АІТ ВНТУ.

## **3 Мета та призначення роботи**

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є створення на основі існуючого інформаційно-освітнього середовища типу «віртуальне виробництво» КНЗ для дослідження здобувачами спеціальності 174 методів та засобів цифрової трансформації технологічного процесу його допоміжного виробництва промислового підприємства в рамках концепції «Індустрія 4.0» ..

НЗ призначені для забезпечення практикумів професійних дисциплін "Кіберфізичні системи автоматизації виробництва" (4 курс бакалаврської підготовки) та "Промисловий Інтернет речей" (1 курс магістерської підготовки).

Використання КНЗ дозволяє створити умови для індивідуальної когнітивної діяльності здобувача при рішенні реальних проєктних задач, сприяє більш глибокому вивченню здобувачем теоретичного матеріалу навчальних

дисциплін, а також дає можливість сформувати у здобувача відповідні професійно-орієнтовані практичні уміння та навички проєктування.

#### **4 Джерела виконання роботи**

Джерелами розробки є такі:

1. Папінов В.М. Багатофункціональна комп'ютеризована лабораторія для наскрізної практичної підготовки студентів спеціальності 151 / В.М. Папінов, Я.А. Кулик // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології/ Міжнародний науково-технічний журнал. – 2018. - №2(36). – С. 89-104.
2. Папінов В.М. Лабораторна імітація «навчальної фабрики»: гібридне моделювання матеріальних потоків / В.М. Папінов // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології/ Міжнародний науково-технічний журнал. – 2020. - №2(40). – С.65-81.
3. Папінов В.М. Industrial Internet of Things: практичне вивчення на базі багатофункціональної комп'ютеризованої лабораторії / В.М. Папінов, Я.А. Кулик // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології/ Міжнародний науково-технічний журнал. – 2019. - №2(38). – С.122-137.
4. Папінов В.М. Автоматизований виробничий склад: гібридне моделювання в навчальній комп'ютеризованій лабораторії / В.М. Папінов // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології/ Міжнародний науково-технічний журнал. – 2020. - №1(39). – С.61-77.
5. Пупена О.М. Автоматизовані системи управління виробництвом (MES-рівень): курс лекцій для студ. освіт. ст. "магістр" спец. 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" спеціалізації "Інтегровані автоматизовані системи управління " денної та заочної форм навчання / О.М. Пупена, Р.М. Міркевич. - К.: НУХТ, 2016. -135 с.

## 5 Показники призначення

Об'єктом досліджень є навчальний процес підготовки у вищому технічному навчальному закладі фахівців з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Такий об'єкт досліджень зазвичай вивчається в рамках наукової дисципліни "Інженерна педагогіка".

Предметом досліджень є підвищення ефективності вивчення здобувачами методів та засобів цифрової трансформації існуючого технологічного процесу у технологічний процес «розумного» цифрового виробництва за рахунок використання в лабораторному практикумі нових НЗ.

Задачі, що вирішуються в ході НДР:

1. Детальне вивчення існуючої реалізації інформаційно-освітнього середовища типу «віртуальне виробництво».
2. Дослідження методів та засобів цифрової трансформації існуючого виробництва у перспективне «розумне» цифрове виробництво.
3. Техніко-економічне та науково-технічне обґрунтування загального бачення нових НЗ.
4. Розробка технічного завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.
5. Проектування програмно-технічного забезпечення нових НЗ.
6. Розробка навчально-методичного забезпечення нових НЗ.

Новий КНЗ має будуватися за загальною архітектурою, що описана в розділі 1 та показана на рисунку 1.23. Ця архітектура будується на основі таких моделей, існуючих в лабораторії «Промислова мікропроцесорна техніка» ФШТА,:

- на фізичній моделі технологічного процесу (ТП) «віртуального» допоміжного виробництва;
- на організаційній моделі «віртуального виробництва»;
- на програмно-технічній імітаційній моделі інтегрованої автоматизованої системи управління (ІАСУ) «віртуальним виробництвом» в цілому та окремими його технологічними процесами.

Загальна архітектура КНЗ відображає послідовність практичного вивчення здобувачем усіх основних стадій процесу цифрової трансформації існуючого автоматизованого ТП допоміжного виробництва, який моделюється в лабораторії, у аналогічний ТП реального «розумного» виробництва, що функціонує в рамках концепції «Індустрія 4.0».

Перша стадія дослідження здобувачем процесу цифрової трансформації має складатися з двох таких етапів:

- формування у здобувача вихідного уявлення про можливу реалізацію даного автоматизованого ТП на реальному виробничому підприємстві (виконується здобувачем у вигляді самостійного дослідження предметної області та отримання необхідних консультацій від викладача);

- додаткове комп'ютерне моделювання статичної та динамічної автоматизованого ТП з метою формування деталізованого уявлення щодо його можливої реалізації на реальному виробничому підприємстві (застосовуються як наявні локальні програмні засоби моделювання, так і доступні хмарні сервіси цифрового моделювання; моделювання здійснюється як здобувачем за індивідуальним завданням в рамках окремих професійних дисциплін або проєктного практикуму, так і викладачем при підготовці навчально-методичних матеріалів цих професійних дисциплін або проєктного практикуму).

Друга стадія дослідження здобувачем процесу цифрової трансформації існуючого автоматизованого ТП передбачає виконання таких етапів:

- дослідження комп'ютерних моделей існуючого автоматизованого ТП, розроблених на попередній стадії, з метою визначення тих основних його недоліків, які в подальшому можна буде усунути шляхом цифрової трансформації у ТП «розумного» виробництва (наприкінці етапу необхідно, щоб здобувач або викладач вибрав один зі знайдених основних недоліків для продовження практичного вивчення здобувачем процесу цифрової трансформації);

- пошук способу вдосконалення існуючого автоматизованого ТП, який

приведе до усунення вибраного основного його недоліку (здобувач може виконувати пошук за участі викладача, який надає при цьому додаткові консультації та роз'яснення).

– пошук способу вдосконалення існуючого автоматизованого ТП за рахунок впровадження сучасних цифрових технологій, які лежать в основі «розумного» виробництва в рамках концепції «Індустрія 4.0» (виконується здобувачем з використанням доступних інформаційних ресурсів Інтернет та навчально-методичними матеріалами, наданих викладачем).

Третя стадія дослідження здобувачем процесу цифрової трансформації існуючого автоматизованого ТП включає пошук та обґрунтований вибір тієї сучасної цифрової технології або технологій в рамках концепції «Індустрія 4.0», які дозволять реалізувати намічене вдосконалення існуючого автоматизованого ТП (виконується здобувачем з використанням доступних інформаційних ресурсів Інтернет та навчально-методичних матеріалів, наданих викладачем).

Четверта стадія дослідження здобувачем процесу цифрової трансформації існуючого автоматизованого ТП пов'язана з розробкою концепції його цифрової трансформації (використовуються як доступні хмарні сервіси цифрового моделювання, так і наявні локальні програмні засоби моделювання; результатом виконання даної стадії є готовий проєкт концептуального рішення цифрової трансформації).

П'ята стадія дослідження здобувачем процесу цифрової трансформації існуючого автоматизованого ТП пов'язана з розробкою ескізного проєкту його цифрової трансформації (характеризується більшою деталізацією проєктних рішень і передбачає активне використання здобувачем як доступних хмарних сервісів цифрового моделювання, так і наявних програмних засобів моделювання; проєкт може бути представлений, наприклад, у вигляді відповідної цифрової моделі або на комп'ютері лабораторії, або на доступному хмарному сервісі цифрового моделювання).

НЗ повинні забезпечувати нормальний режим роботи без втрати працездатності на протязі навчального року.

Умови експлуатації навчального засобу:

- температурний повітря від плюс 10 °С до плюс 35 °С;
- допустима вологість повітря до 90%.

## **6 Економічно-технічні показники роботи**

До основних економічних показників розробки треба віднести такі:

- термін окупності інвестицій до 3 років;
- витрати на розробку навчального засобу, тис. грн.. – до 85,0 ;
- абсолютний ефект від впровадження, тис. грн.. – не менше 350,0;
- внутрішня дохідність інвестицій, % – не менше 42 ;

## **7 Стадії виконання роботи**

7.1. Етап «Науково-технічне та техніко-економічне обґрунтування роботи» та розробка технічного завдання має бути виконаний до 05.10.25 р.

7.2. Етап «Проектування стадії «Моделювання існуючого автоматизованого ТП»» має бути виконаний до 25.10.25 р.

7.3. Етап «Проектування стадії «Аналіз реального автоматизованого ТП»» має бути виконаний до 10.11.25 р.

7.4. Етап «Проектування та реалізація заключної стадії практичного вивчення цифрової трансформації» має бути виконаний до 20.12.25 р.

7.5. Етап «Економічний розділ» має бути виконаний до 01.12.25 р.

## **8 Порядок контролю та приймання роботи**

8.1 Рубіжний контроль – 02.12.25 р.

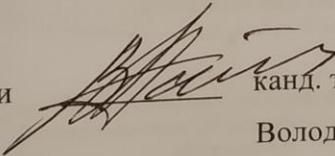
8.2 Попередній захист – 03.12.25 р.

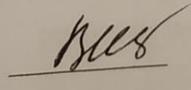
8.3 Захист роботи – в період з 07.12.25 р. по 19.12.25 р. за графіком, встановленим кафедрою АІТ.

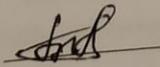
Додаток Б  
(обов'язковий)  
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

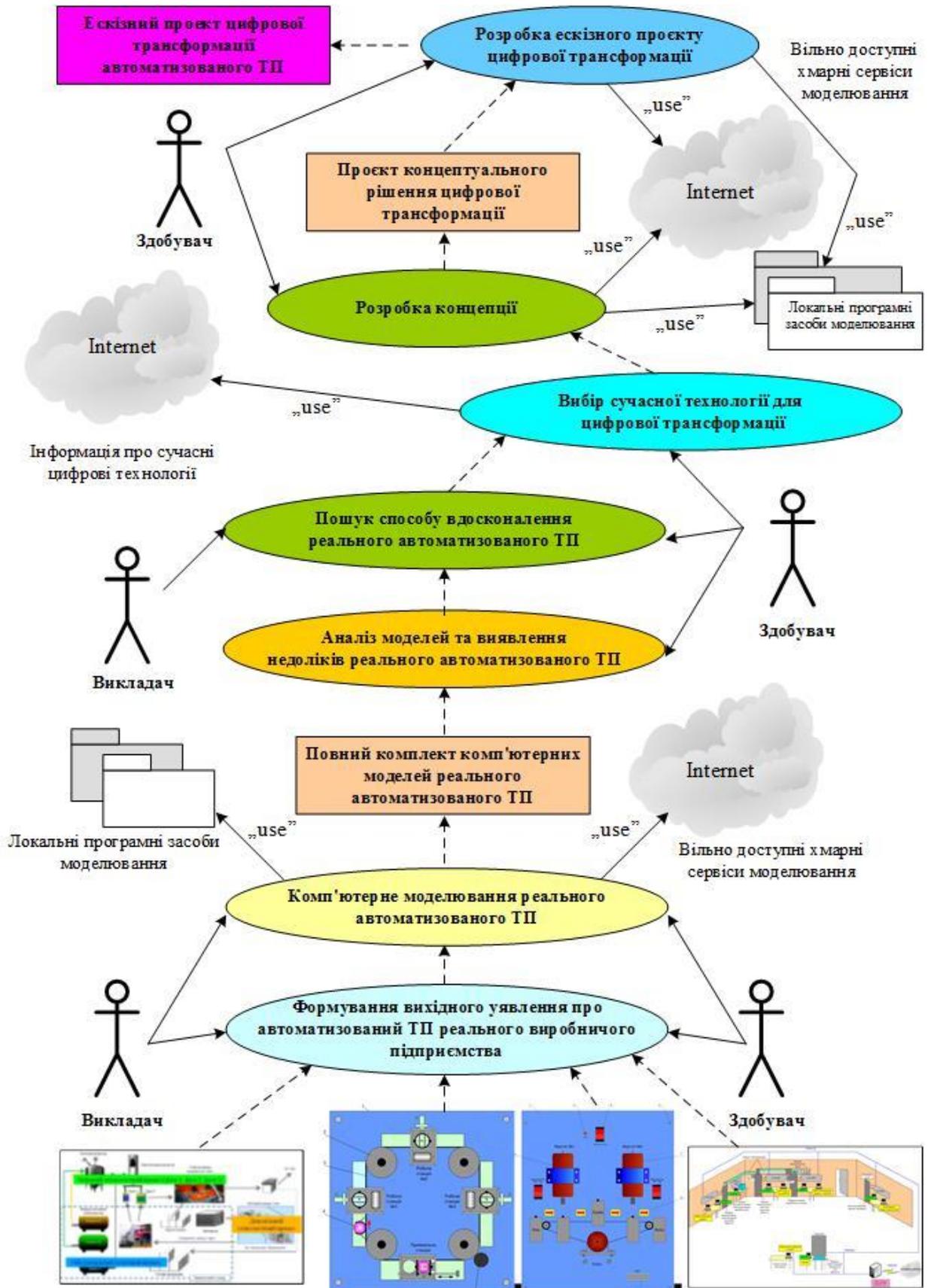
КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ПРАКТИЧНОГО  
ВИВЧЕННЯ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ДОПОМІЖНОГО ВИРОБНИЦТВА  
НА ХІМІЧНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

Зав. кафедри АІТ \_\_\_\_\_ д-р техн. наук, професор каф. АІТ  
Олег БІСІКАЛО

Керівник роботи  канд. техн. наук, проф. каф. АІТ  
Володимир ПАПІНОВ

Опонент  канд. техн. наук, доцент каф. КН  
Валерій ДЕНИСЮК

Здобувач \_\_\_\_\_ Андрій ТИМЧУК  
гр. АКІТР-24м 



Фізична та програмна реалізація ІАСУ технологічним процесом „віртуального виробництва”

Рисунок Б.1 - Архітектура комп'ютеризованого навчального засобу

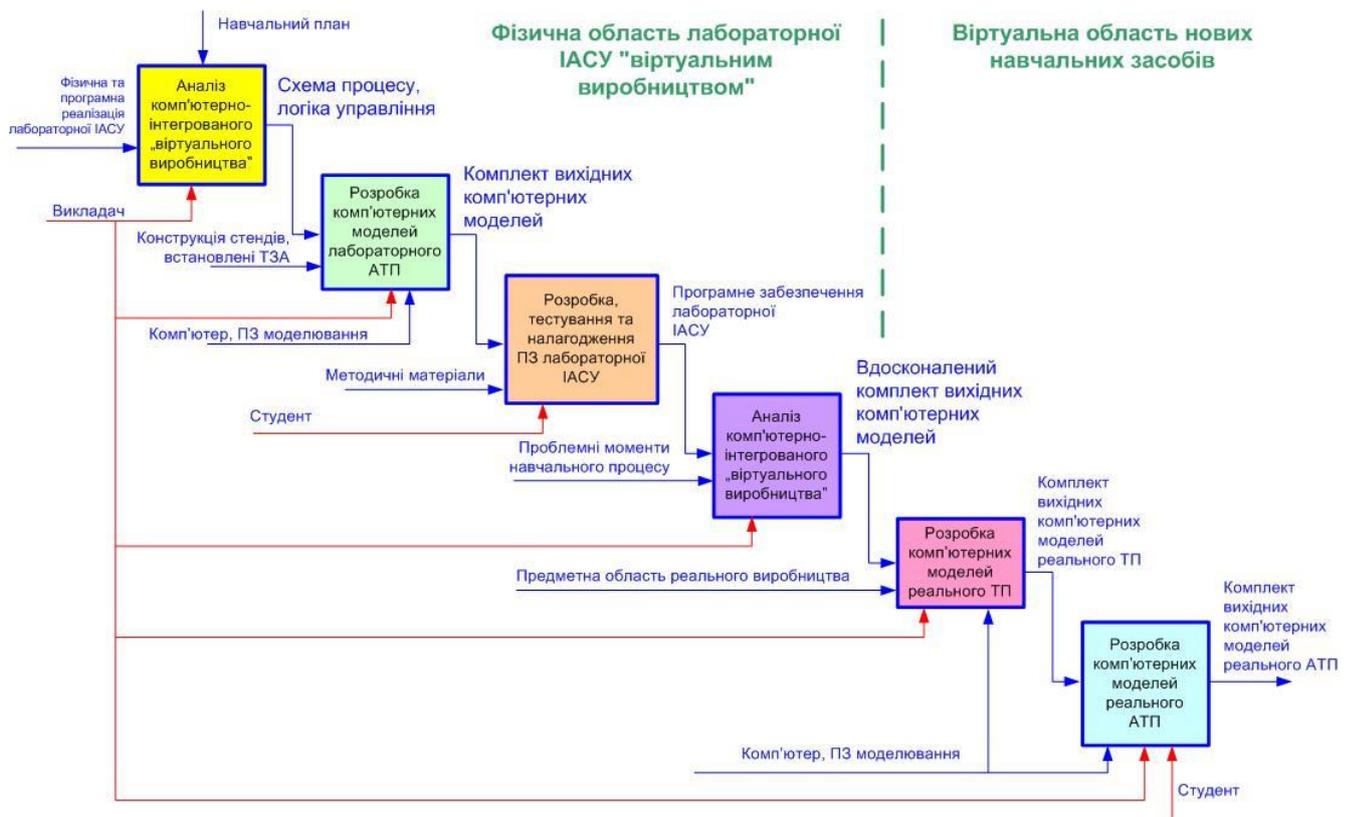
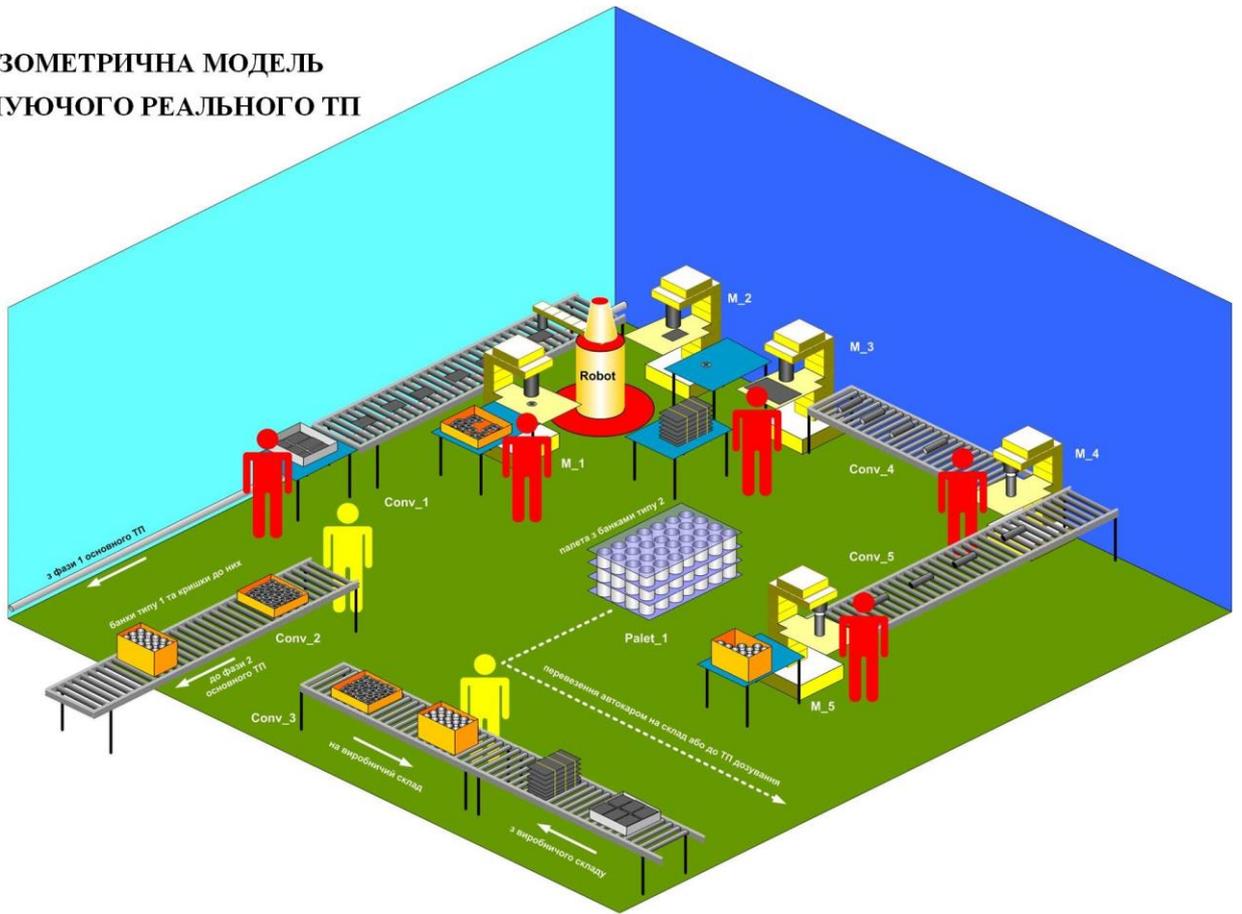


Рисунок Б.2 - Проектування процесу виконання стадії «Моделювання існуючого АТП»

**ІЗОМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ  
ІСНУЮЧОГО РЕАЛЬНОГО ТП**



**ІЗОМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ  
ІСНУЮЧОГО РЕАЛЬНОГО АТП**

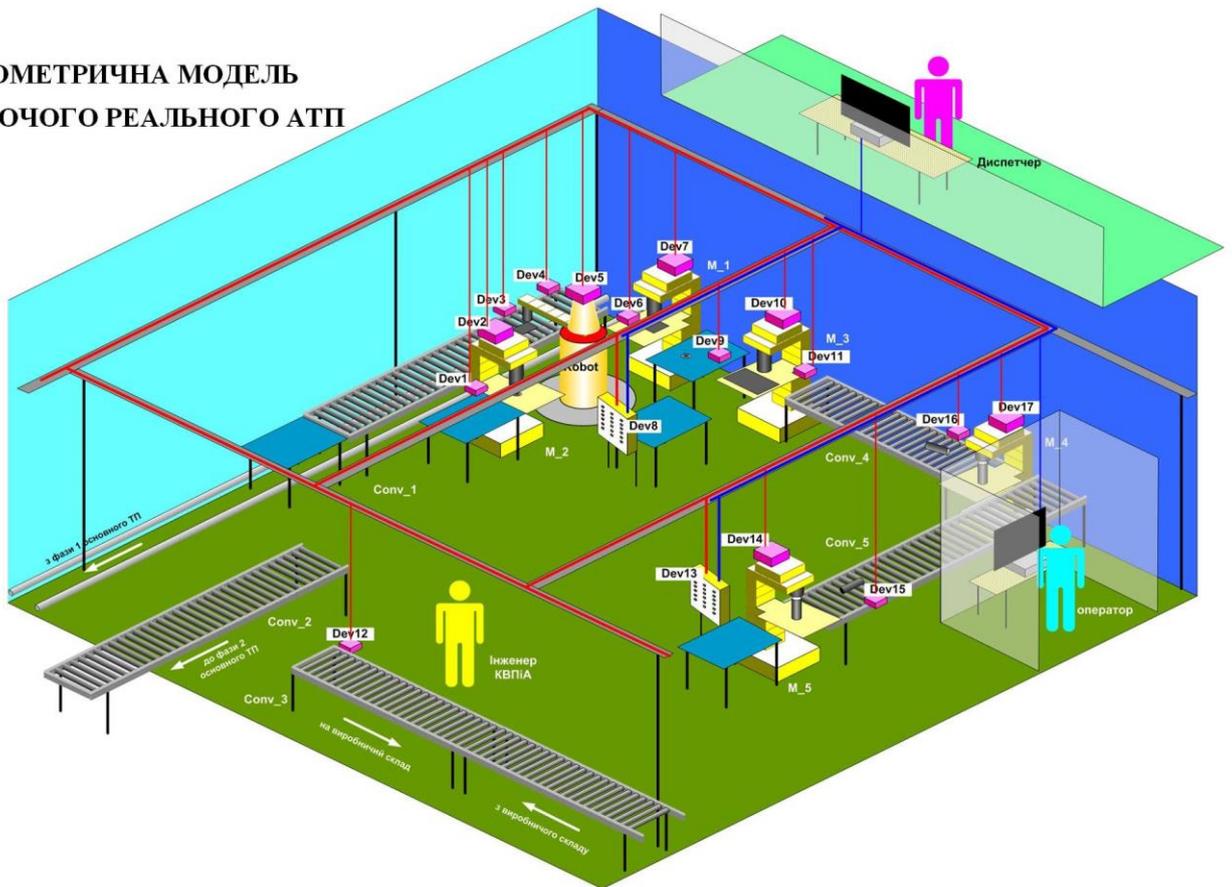
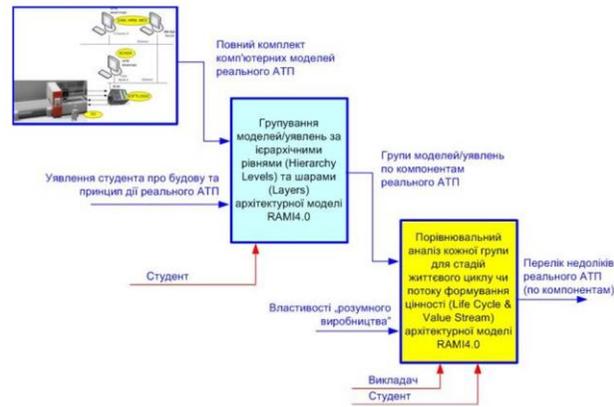


Рисунок Б.3 - Моделювання існуючого реального АТП

## ЗАГАЛЬНЕ БАЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИКОНАННЯ СТАДІЇ



## АЛГОРИТМ ВИКОНАННЯ СТАДІЇ



## ПРИКЛАД ПРАКТИЧНОГО ВИКОНАННЯ СТАДІЇ

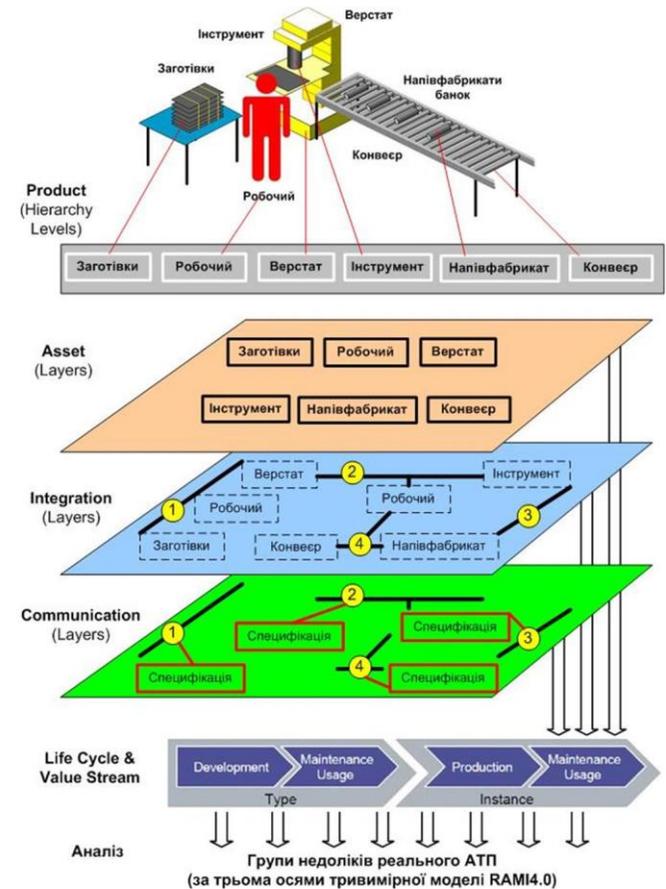


Рисунок Б.4 - Проектування процесу виконання стадії "Аналіз реального ATP"

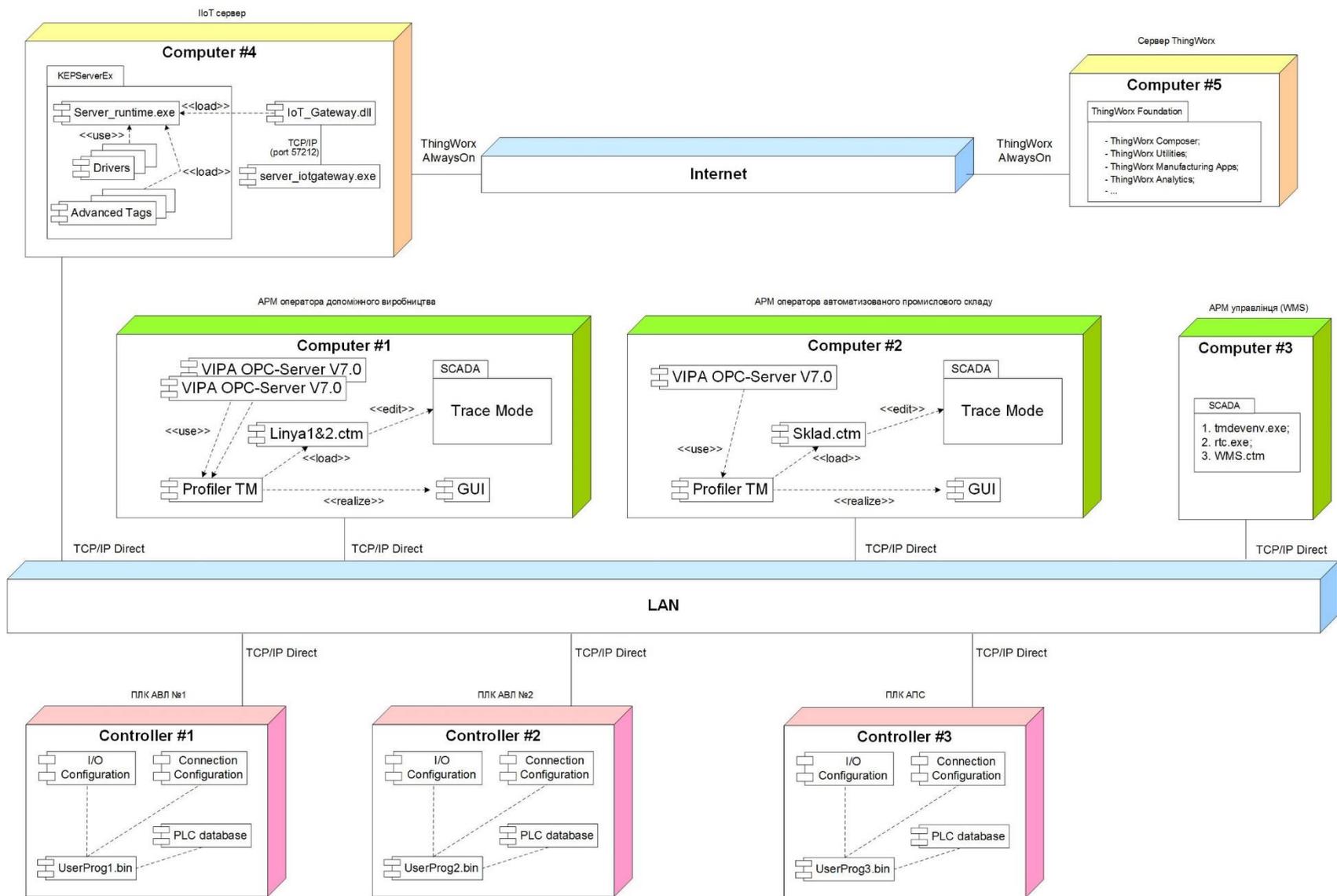
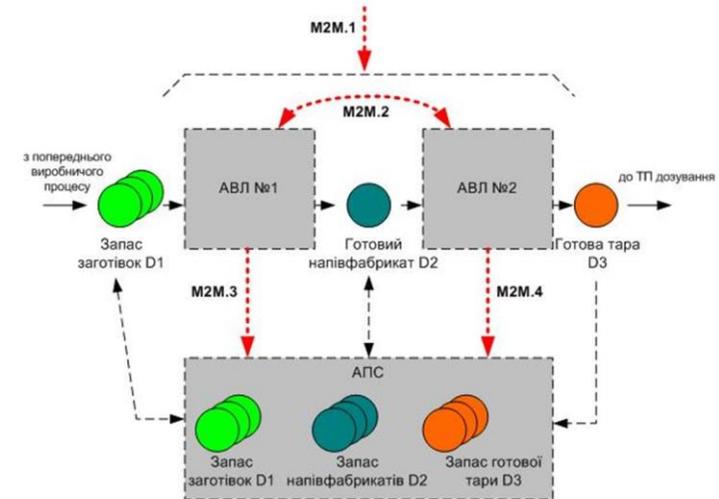
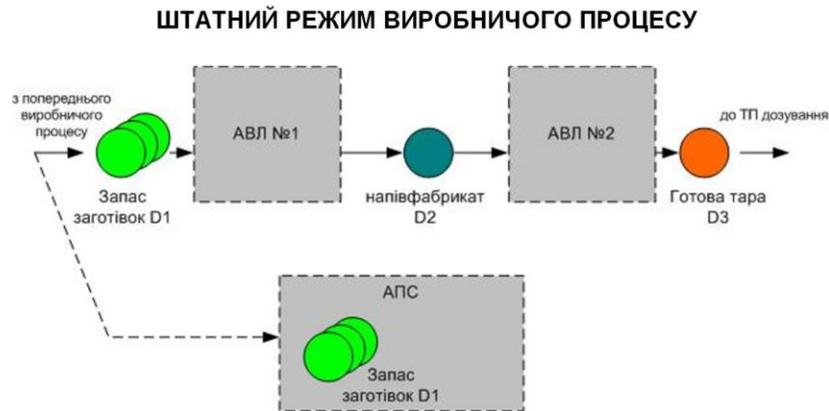


Рисунок Б.5 - Проект архітектури програмного забезпечення АТП для І4.0

## МАШИНО-МАШИННІ ВЗАЄМОДІЇ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ НЕШТАТНИХ СИТУАЦІЙ



## ПРОЕКТИ МАШИНО-МАШИННИХ ВЗАЄМОДІЙ

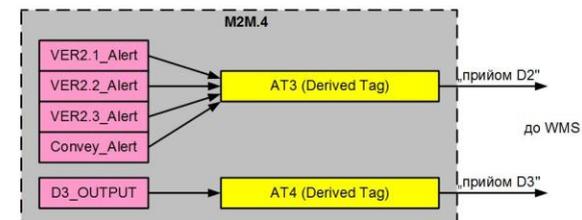
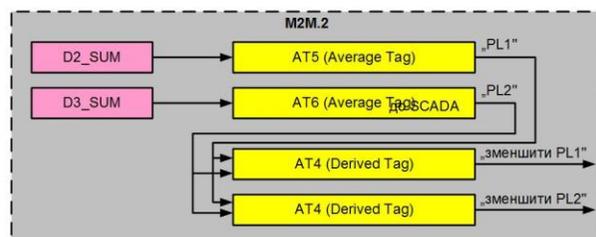
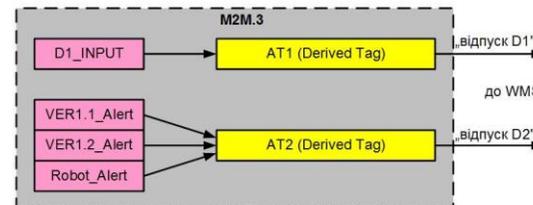
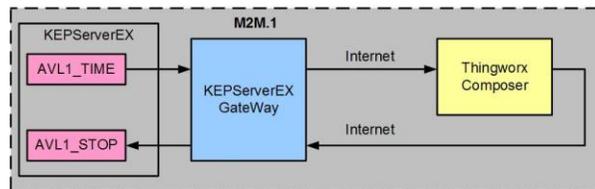


Рисунок Б.6 - Проектування машино-машинних взаємодій АТП для І4.0

Додаток В

(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Комп'ютеризований навчальний засіб для практичного вивчення цифрової трансформації допоміжного виробництва на хімічному підприємстві»

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота  
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра АІТ  
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism (КПІ) 18,97 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту.
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

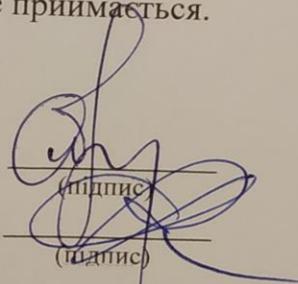
Експертна комісія:

Бісікало О.В., зав. каф. АІТ

(прізвище, ініціали, посада)

Овчинников К.В., доц. каф. АІТ

(прізвище, ініціали, посада)

  
(підпис)  
(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку \_\_\_\_\_  
(підпис)

Маслій Р.В.  
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник \_\_\_\_\_

Папінов В.М., проф. каф. АІТ

Здобувач \_\_\_\_\_

Тимчук А.О.